

원전 배관 내부유체의 자성 이물질 제거에 관한 연구

최운환* · 김오근** · 서용권***

A Study on Removing the Magnetic Impurity in a Nuclear Pipe Line

Yoon-Hwan Choi*, Oh-Kuen Kim**, Yong-Kweon Suh***

Key Words : *Magnetic impurity(자성이물질), Nd-Fe-B magnet(Nd 자석), Expansion(확대관), Contraction(축소관), Strainer(여과기), Tiny particle(미소입자)*

ABSTRACT

This work focuses on eliminating tiny particles from the coolant in a nuclear pipe line by using a permanent magnet on the exterior surface of the pipe. This method have some merits compared with the currently applied methods and is expected to be applied to most of the pipe lines in the nuclear plant. For instance in this method, a ring is attached to the exterior surface of the pipe, so that it does not affect the inflows directly. Further, the cost needed in the initial build-up of the facility is low.

1. 서론

여기에 현재 원자력 발전소와 화력발전소 등에서 사용되는 배관 및 밸브의 재질은 대부분이 탄소강 또는 스테인레스강이 사용되고 있으며, 탄소강인 경우에는 자성을 지니고 있다. 따라서 증기발생기와 각종 열교환기, 탱크 그리고 발전기등은 철계 이물질에 의해 튜브의 손상과 고정자 권선의 Pin Hole 발생등의 위험성을 내포하고 있다. 또한 발전소 계통 및 배관 내의 이물질 유입은 각종설비의 손상을 초래하고 발전설비의 신뢰성 및 안전성에 장애를 발생시킨다⁽¹⁾. 따라서 현재 발전소 배관 내의 이물질 방지는 예방(foreign material exclusion) 및 스트레이너, 필터설치 및 점검 시행을 행하고 있다⁽²⁾.

그러나 스트레이너나 필터가 걸러내지 못하는 미소한 입자들은 배관표면에서 시간이 경과함에 따라 성장하게 되고 결국은 표면에서 이탈하여 장치에 치명적인 손상을 초래하게 된다.

발전계통 내의 이물질 유입으로 인한 피해들을 살펴 보면, 1989년 1월 27일 Belleville2⁽³⁾(Reactor PWR - 1310 MW)에서 이물질 유입에 의하여 증기발생기 전열관이 손상되어 1차측에서 2차측으로 누설이 발생한 사례가 있다. 또한 2001년 4월 17일에는 Byron Unit 2⁽⁴⁾(Turbine Manufacturer : Westinghouse, Rating : 1175 MWE)에서 증기발생기 2차측에서 용접봉으로 보이는 이물질이 발견되었으며, 이물질이 발견된 부위의 증기발생기 전열관에 손상을 입은 바 있다. 2002년 3월 26일에는 Nine Mile Point Unit 2⁽⁵⁾(Turbine Manufacturer : GE, Rating : 1225 MWE)에서 부적절한 이물질 유입방지관리 및 세척수행으로 비상노심 냉각계통 입구측 스트레이너에서 여러종류의 이물질이

* 동아대학교 생산기술연구소

** (주)한국수력원자력

*** 동아대학교 기계산업시스템
E-mail : neoyoon@nate.com

발견되었으며, 마지막으로 2002년 4월 26일에는 Darlington Unit 3⁽⁶⁾(Reactor Manufacturer : AECL, Rating : 881 MWE)의 증기발생기 #3 Hot Leg 튜브 1개에서 끝단이 손상된 것을 발견하였고, 손상원인은 작은 이물질이 손상을 유발했을 것으로 추정하였다. 그리고 증기발생기 #1의 Cold Leg에서도 튜브 2개가 손상된 것을 추가로 발견하였으며 이 또한 이물질에 의한 것이라 추정하였다.

이와 같이 미소한 입자들은 현재 사용하는 장치에 의해서는 제거가 불가능하므로 본 연구에서는 자성 이물질 제거에 하나의 방법으로 자석을 이용하는 방법을 제시하고자 한다. 현재 조사된 바로는 자석을 이용하여 이물질을 제거하는 연구나 적용사례를 찾을 수 없었으며 본 연구가 최초의 시도라 생각된다.

2. 수치해석 및 실험방법

2.1. 수치해석방법

본 연구에서는 열·유체해석 상용코드인 FLUENT를 이용하였으며, 격자계 생성은 Gambit을 이용하여 구성하였으며 격자수는 축소, 확대관을 포함하는 경우에서 75만개이고 직관인 경우는 35만개 정도이며, 비구조적 격자계를 사용하였다⁽⁷⁾.

수치해석시 시간에 대해서는 음적 오일러법, 대류항에 대해서는 풍상차분법, 압력항에 대해서는 SIMPLE법으로 처리하였다. 입구난류강도는 10%, 모델상수 C는 0.1로 두었으며 초기 입구에서의 유속은 0.48, 0.96 m/s로 주었다. 벽면에서의 경계조건은 no-slip 조건을 적용하였다.

2.1. 실험방법

Fig. 1는 실험장치를 도시한 것이다. 실험장치는 크게 펌프, 직관, 곡관, 저장탱크, 바이패스 장치와 온도 조절기, 유량계로 구성되어 있다. 유체 유입장치의 재질은 PVC이며, 검출부는 스테인레스강을 사용하였다.

실험순서는 먼저 펌프에서 유입된 유체는 안정된 유동 상태를 유지하기 위해서 정류기(honey comb)를 거쳐 검출부를 통과한다. 검출부에는 링형 자석과 반원형자석이 설치된다. 본 연구에서는 시중에 유통되는 자석의 종류와 특성을 비교하여 자하량이 큰 네오

디뮴(Nd-Fe-B Magnet)^(8, 9) 자석을 선택하였다. 본 연구에 사용된 자석 세기는 링형인 경우에 약 1200 Gauss 정도가 측정되었으며, 반원형의 자석은 약 3000 Gauss가 측정되었다. 링형자석은 자력선의 방향이 관에 평행하게 나가므로 관에 수직인 방향으로 자력선을 통과하기 위하여 2개의 자석 사이에 링형태의 탄소강을 부착하였다.

링형자석은 검출부의 내경이 1 inch인 경우에 사용되었고, 반원형 자석은 2 inch인 경우에 사용되었다. 실험장치에서 주 배관의 내경이 2 inch이므로 링형 자석이 부착된 경우에는 확대관과 축소관이 존재한다. 실험에서는 1 inch인 경우 확대, 축소관에 그리고 곡관과 직관에 링형 자석을 부착하여 각각의 특성을 파악하였다.

내경이 2inch인 경우는 N극과 S극을 가지는 반원형 자석을 부착하여, 이물질 검출 특성을 파악하였으며, 또한 자석의 수를 1개 2개 3개로 변화시켜 이에 따른 이물질 제거 특성도 조사하였다.

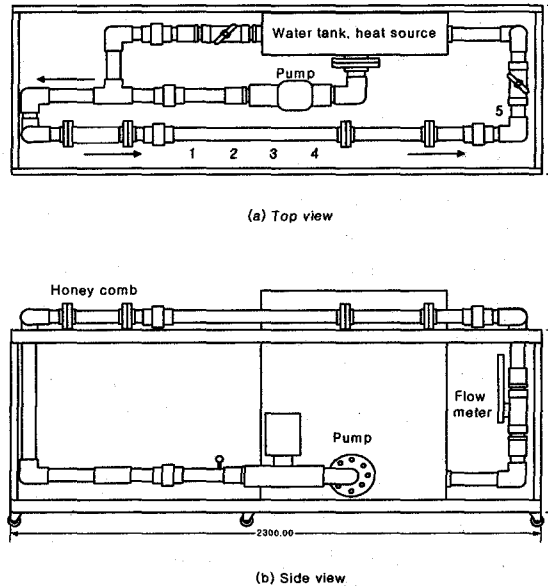


Fig. 1 Experimental facility

배관 내에 유입된 자성이물질은 기존의 스트레이너나 필터가 걸러내지 못하는 수 nm의 직경을 가지는 미소한 크기의 입자가 사용되었으며, 배관 내부에서 입자가 자석에 의하여 부착된 형태와 부착량을 조사하기 위하여 산업용내시경(KARL STORZ techno cam 812800 01/812800/101)으로 배관 내부를 촬영하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 Re 변화에 따른 이물질 제거 특성

Fig. 2은 관내경이 0.0508 [m]인 경우에 있어서 입구 유속을 0.24~1.92 [m/s]로 변화시켜 자성이물질이 내벽면에 부착하는 형상을 내시경을 이용하여 촬영한 것이다. 이 경우 Reynolds 수는 12200~97540이고 반원형 자석이 부착된 위치는 직관의 입구에서 0.1 [m] 지난 곳이다. 그림에서 부착된 형태를 보면 자석의 형태와 유사한 모양으로 부착되어 있음을 알 수 있다. 즉 반원형 자석의 자하량은 N극과 S극이 만나는 지점이 가장 작고 반원형의 중간지점이 가장 크게 나타나기 때문에 그림에서와 같은 형태를 띄게되며 이러한 형상은 모든 경우에서 동일하게 나타난다.

입구유속 변화에 따른 부착 형태를 살펴보면, 입구 유속이 0.24 [m/s]인 경우가 자성이물질의 부착량이 가장 많은 것으로 보여지고 있으며, 0.48 [m/s]에서도 이물질이 비교적 많이 부착되어 있음을 확인 할 수 있다. 그러나 유속이 0.96 [m/s]와 1.92가 되면 현재 위치에서 자성이물질의 부착량이 현저하게 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 실험에 들어가기 전에는 유속이 빨라지면 난류에너지가 증가할 것이고 에너지가 증가하면 자성이물질이 관의 반경방향으로 활발히 움직일 것이므로 벽면에 부착된 자석이 방출하는 자기장의 영역으로 들어갈 확률이 높아질 것이므로 유속이 빠를 때가 이물질이 벽면에 많이 부착할 것이라고 예측하였다.

그러나 실험을 수행한 결과는 이와는 반대현상을 보인다. 이러한 요인을 분석해보면 유체의 운동에너지가 자기에너지보다 클 경우에는 벽면에 부착되고 작은 경우는 유동과 함께 흘러가 버리는 것이다. 따라서 운동에너지와 자기에너지 사이의 관계를 규명하여 임계지점을 구해야 정확한 결과예측이 가능해진다고 생각된다.

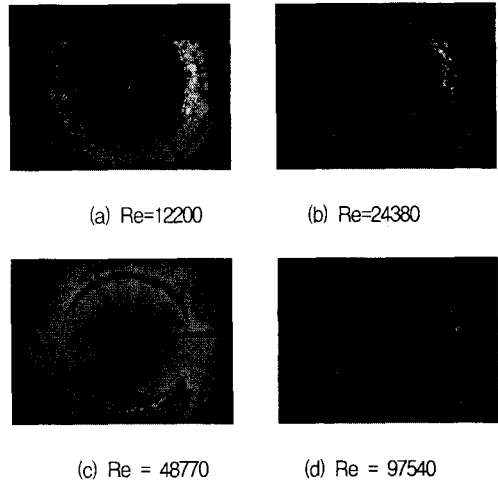


Fig. 2 Capture image of the magnetic impurity in a pipe line for various Reynolds numbers, $D = 0.0508$ m

3.2 자석의 장착 위치에 따른 부착형태

관 내경이 0.0508 [m]인 관에 대하여 각각 직관의 입구, 중앙 그리고 출구와 곡관에 자석을 부착하여 관 내부의 부착 형태를 파악하였다.

Fig. 3는 각각에 대한 내시경 사진이다. 그림에서 입구쪽과 출구쪽에서 이물질이 부착된 형태는 비슷하게 나타난다. 그리고 중앙쪽과 곡관에서는 입·출구 쪽과는 다른 양상을 보인다. 이 네 곳의 부착형태를 비교해보면 직관의 중앙에 설치된 자석에 의한 이물질 부착량이 가장 많은 것으로 보이며, 곡관부분이 가장 작은 것을 알 수 있다. 그리고 직관의 입·출구는 이 두 가지지점의 중간 정도의 이물질 부착량을 보인다. 이러한 결과는 입구와 출구에서는 속도의 변동성분이 관 중앙에 비해서 크기 때문이라고 생각되며, 곡관에서는 이러한 변동성분이 가장 크게 나타나기 때문이다. 곡관에서의 속도변동 현상은 수치해석을 통해서도 확인할 수 있었다(Fig. 4).

Fig. 5은 관내경이 0.0254 [m]인 경우 이물질 부착 모습을 내시경으로 촬영한 것이며, 자석의 부착위치는 각각 급축소, 중앙, 급확대, 곡관부분이다. 그림에서 빨간색은 이물질이 관 벽면에 부착하여 시간이 경과함에 따라 산화된 것이다. 그림에서 보면 급축소부분에 비하여 급확대관에서 이물질 부착량이 작게 나타난다.

이것은 급축소부분에서는 관의 직경이 작아지므로 유동이 다소 안정해지지만 급확대 부근에서는 제트유동의 형태를 띄므로 유동이 상당히 불안정한 모습을 보이고 시간에 대한 속도의 변동이 가장 심하게 나타나기 때문이다.

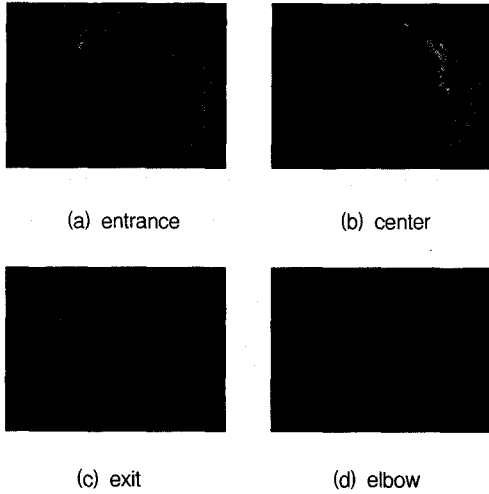


Fig. 3 Capture image of the magnetic impurity in a pipe line for various positions of magnet, $D = 0.0508$ m

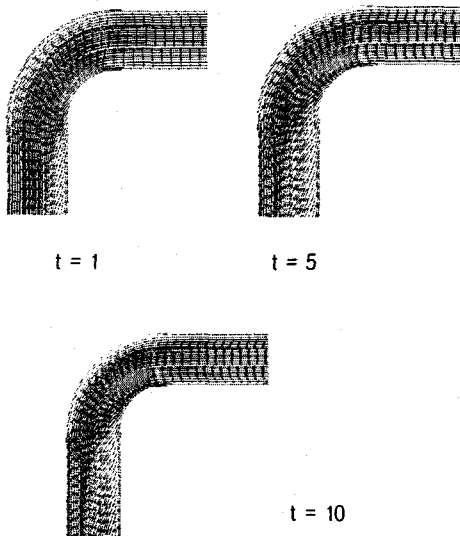


Fig. 4 Velocity vector plot at $t=1, 5, 10$ second for $Re=24380$, $D=0.0508$ in an elbow

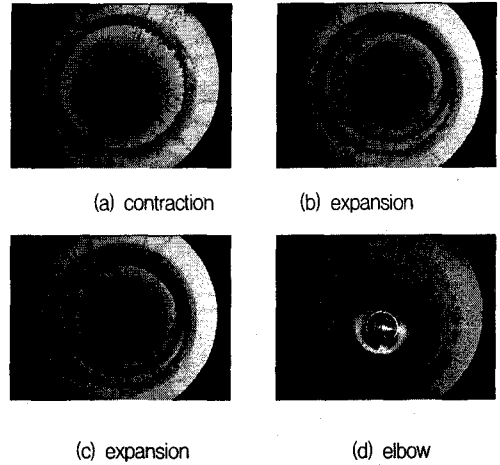


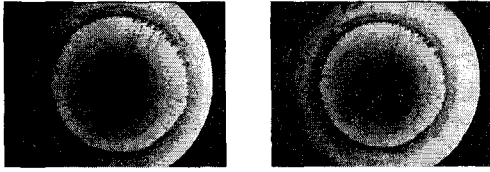
Fig. 5 Capture image of the magnetic impurity in a pipe line for various positions of magnet, $D = 0.0254$ m

3.3 수온 변화에 따른 이물질 부착특성

실험에서는 수온의 범위를 $20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 로 하여 수온 변화에 따른 이물질 부착 특성을 살펴보았다. Fig. 6는 관내경이 0.0254 [m]인 경우 수온의 변화에 대한 관내부의 이물질 부착형태를 내시경으로 촬영한 것이다. 그림에서 수온이 20°C 인 경우와 40°C 인 경우는 이물질이 부착된 형태가 유사하게 나타난다. 그러나 수온이 60°C 인 경우에는 수온이 낮은 경우보다 이물질이 적게 부착되는 것을 관찰할 수 있다. 네오디뮴 자석의 특성상 수온이 60°C 가 되면 자하량은 30%이하로 감소한다. 자하량의 감소에 비해서 이물질이 부착되는 형태가 비교적 깨끗하게 나타나는 것은 관 내부유체는 약 60°C 를 유지하지만 관 외부는 공기와의 열전달에 의하여 이보다는 온도가 낮게 나타나기 때문이다.

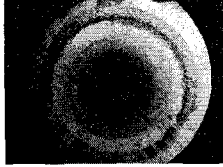
4. 결론

본 연구에서는 배관 내에 존재하고 기존의 스트레이너나 필터가 걸러내지 못하는 자성이물질들을 제거하는 새로운 방안으로 영구자석을 이용하는 것에 대하여 가능성과 제거특성을 파악하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.



(a) T = 20°C

(b) T = 40°C



(c) T = 60°C

Fig. 6 Capture image of the magnetic impurity in a pipe line for various a liquid temperature, $D = 0.0254$ m

- 1) 속도가 완만히 변하는 곳에서는 자성이물질의 부착량이 많아지지만, 속도의 변동성분이 크게되면 유체의 운동에너지가 자석의 자기에너지에 비하여 커지므로 이물질제거가 잘 이루어지지 않는다.
- 2) 유속에 대한 이물질제거 능력저하는 비교적 크지 않은 것으로 파악되었다.
- 3) 수온이 증가하면 자석의 세기가 약해져 이물질제거 성능이 저하되므로 수온 변화에 비교적 세기변화가 작은 자석을 선택하거나 자석의 온도를 낮추는 냉각장치가 필요하다.

후 기

본 연구는 2001년도 산업자원부·한전전력연구원 지원(관리번호 01-016) 전력기술 기초연구과제로 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 이대수, 발전소 취수구 수리학적 최적 모델링 기술 개발, 한국전력공사 원전기술고도화 Workshop, pp. 3~16, 2000.
- (2) 정기상, 가동중점검 관리 시스템 개발, 한국전력공사 원전기술고도화 Workshop, pp. 291~298, 2000.
- (3) Belleville 2, ENR PAR 89-024, Primary to Secondary Leak in a Steam Generator, WANO, 1989. 1. 27.
- (4) Byron Unit 2, OE12683-Foreign Object Retrieved From Secondary Side of 2D Steam Generator, EXELON, 2001. 4. 17.
- (5) Nine Mile Point Unit 2, OE13690-Sup. Pool Debris, INPO, 2002. 3. 26.
- (6) Darlington Unit 3, WOE00535-PHWR Event-Damaged Tube Ends on Steam Generator #3 Tubesheet, Darlington, 2002. 4. 26.
- (7) 심요섭, 허형석, 변동근, 서용권, 원관내 밸브 디스크 회전각의 변화에 따른 유동특성, 제2회한국유체공학학술대회, pp. 75~78, 2002.
- (8) 나카무라 히로시, 자석의 ABC, Blue Backs, pp. 106~116, 1994.
- (9) 박정우, 수직자장하에서 원관내 자성유체의 거동에 관한 연구, 동아대학교 석사학위논문, pp. 1~4, 1997.