

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.4.429

감육예측 및 수치해석 기법을 활용한 소구경 탄소강배관 감육영향 분석에 관한 연구[§]

이대영* · 황경모*[†] · 진태은* · 박 원** · 오동훈**

* 한국전력기술(주), ** 한국수력원자력(주)

Technology Based on Wall-Thinning Prediction and Numerical Analysis Techniques for Wall-Thinning Analysis of Small-Bore Carbon Steel Piping

Dae Young Lee*, Kyeong Mo Hwang*[†], Tae Eun Jin*
Won Park** and Dong Hoon Oh**

* Korea Power Engineering Company, Inc.,

** Korea Hydro & Nuclear Power Co, LTD.

(Received July 17, 2009 ; Revised December 2, 2009 ; Accepted February 10, 2010)

Key Words: Wall Thinning(감육), Flow Accelerated Corrosion(유동가속부식), Small Bore Piping (소구경 배관), Cavitation(캐비테이션), Flashing(플래싱)

초록: 국내를 포함한 전 세계 50여개 원전의 발전사업자는 유동가속부식에 의한 탄소강 배관 감육을 관리하기 위하여 CHECWORKS 프로그램을 이용하고 있다. CHECWORKS 프로그램은 대구경 배관에만 적용 가능한 것으로 알려져 있기 때문에 소구경 배관에 대해서는 현장 배관감육 관리 담당자의 경험과 판단에 따라 배관을 관리하고 있다. 이에 따라 본 논문에서는 국내 원전 소구경 배관 4개 라인그룹에 대하여 CHECWORKS 프로그램과 FLUENT 코드를 이용하여 유동가속부식과 유동 특성을 분석하였다. 그 결과 현장 배관감육 관리 담당자의 기술력에 따라 CHEC- WORKS 프로그램도 소구경 배관 감육 관리에 이용할 수 있는 것으로 나타났다.

Abstract: In approximately fifty utilities, including KHNP (Korea Hydro & Nuclear Power), CHECWORKS is used as a tool for predicting and managing the wall thinning of carbon steel piping; this wall thinning is caused by flow-accelerated corrosion (FAC). It is known that CHECWORKS is only applicable to predict the wall thinning of piping with large bores. When dealing with small-bore steel piping, FAC engineers measure the thickness of the susceptible area that is selected on the basis of the experience and judgment of the engineer. This paper proposes the application of CHECWORKS for the management of wall thinning of small-bore piping. Four small-bore pipelines of a domestic nuclear power plant were analyzed from the viewpoints of FAC and fluid dynamics by using CHECWORKS and FLUENT code. Depending on the engineer's skill, CHECWORKS can also be used for the management of wall thinning of small-bore piping.

1. 서 론

1986년 미국 Surry 원전의 급수계통 엘보우 배관이 유동가속부식으로 인해 파단되는 사고^(1,2)가 발생한 이후 유동가속부식은 국내외 원전 2차계통 탄소강배관의 파단과 누설에 원인이 되어 왔다. 이에 따라 미국 EPRI에서는 CHECWORKS 프로그램을 개발하여 발전운영자가 배관 두께측정, 데이터 평가 및 관리계획을 수립하여 배관감육을 관리할 수 있도록 하였다.

현재까지 전 세계의 많은 발전운영자는 이 프로그램을 사용하여 배관감육을 관리하고 있지만 유동가속부식으로 인한 사건은 아직도 발생하고 있다. 특히 소구경 탄소강배관에 대해서는 CHECWORKS 프로그램 해석결과의 신뢰성이 낮은 것으로 판단하여 대부분 적용하지 않고 있으며, 배관감육 관리담당 엔지니어의 경험과 판단에 따라 두께측정을 수행하여 감육영향을 관리하고 있다. 이에 따라 본 논문에서는 CHECWORKS 프로그램과 상용 수치해석 프로그램인 FLUENT 코드를 이용하여 국내 특정 원전의 소구경 탄소강배관에 대한 유동가속부식 영향을 분석함으로써 CHECWORKS 프로그램을 소구경 배관의 감육 관

§ 이 논문은 2009년도 유체공학부문 춘계학술대회 (2009. 5. 21-22., BEXCO) 발표논문임

[†] Corresponding Author, hkm@kopec.co.kr

리에 보완적으로 적용할 수 있는지의 여부를 검토하였다.

2. 소구경 배관 감육 해석

2.1 해석모델 구성

검토대상 소구경 탄소강배관은 국내 원전의 습분분리재열기 및 고압터빈에서 복수기까지 연결된 4개의 배관라인이다. 각 배관라인은 유량 조절을 위한 컨트롤 밸브가 설치되어 있어 편의상 라인에 설치된 컨트롤 밸브를 기준으로 명칭을 구분하였다. 각 배관라인은 Fig.1과 같으며 컨트롤 밸브만 설치된 라인(이하 밸브 라인)과 추가로 오리피스가 설치된 라인(이하 오리피스 라인)이 있는 두 가지 형태로 모두 복수기로 연결되어 있다. 각 소구경 배관에 설치된 컨트롤 밸브는 터빈 출력에 따라 개폐가 반복되어 해당 라인은 감육에 특히 민감하다. 각 배관라인 밸브의 터빈 출력별 운전조건은 Table 1과 같고 15%, 30%, 100%의 터빈출력을 기준으로 밸브 개폐가 반복된다. Table 2는 각 컨트롤 밸브가 닫혀 오리피스 라인에만 유량이 형성되는 경우의 해석조건이다. 해석 방법은 CHECWORKS 프로그램 내의 열수력 해석인 Network Flow Analysis (NFA)와 감육 해석인 Wear Rate Analysis (WRA)를 이용하였다.³⁾ CHECWORKS 프로그램에서 제공하는 NFA는 유체가 흐르는 관로 입구(Source)와 출구(Sink) 측의 부분적인 유체 상태량과 입구와 출구까지의 관로 형상에 따라 해석을 수행하게 된다.

NFA 해석에서 관로의 형상은 입, 출구가 단일 라인으로 구성된 경우가 Type 1이고 입구측에 두 개 라인이 들어와 합쳐진 후 한 개 라인으로 출구로 배출되는 것이 Type 3이다. Table 3은 컨트롤 밸브가 열려 입구측의 밸브 라인과 오리피스 라인으로 유량이 형성되는 Type 3의 해석조건을 나타낸 것이다.

2.2 해석결과 분석

CHECWORKS 프로그램을 이용하여 해석한 Type 1과 Type 3의 해석결과는 모두 현재시점의 운전조건을 고려한 것이며, Type 1, 3 별로 잔여수명, 건도 및 유속을 비교하였다. Fig 2~7에서 Component Order는 배관라인 시작부터 끝까지 감육 해석의 최소단위인 컴포넌트(엘보우, 직관 등 개별 배관요소)의 순서를 나타낸 것이다.

Table 1 Operating conditions by line

터빈출력 라인명	0~15%	30%	100% (정상출력)
MV01	열림→단힘	단힘	단힘
MV02	열림	열림→단힘	단힘
MV03	열림→단힘	단힘	단힘
MV04	상시 운전		

Table 2 NFA analysis condition for type 1

라인명	경계조건	입구(Source)		출구(Sink)	
		정압, psig	엔탈피, Btu/lb	정압, psig	엔탈피, Btu/lb
MV01 ¹⁾	Known source, sink/Flow rate unknown	99.12	308.70	-13.91	N/A
MV02 ²⁾		28.81	243.00	-13.91	N/A
MV03 ³⁾		99.12	308.70	-13.91	N/A
MV04 ⁴⁾		175.089	350.83	-13.91	N/A

[주] 1) 정상 출력 운전시 데이터, 2) 30% 출력 운전시 데이터, 3) 정상 출력 운전시 데이터, 4) 정상 출력 운전시 데이터

Table 3 NFA analysis condition for type 3

라인명	경계조건	입구(Source)		출구(Sink)	
		압력, psig	엔탈피, Btu/lb	압력, psig	엔탈피, Btu/lb
MV01 ¹⁾	Known source, sink/Flow rate unknown	99.12	308.70	-13.91	N/A
MV03 ²⁾		99.12	308.70	-13.91	N/A

[주] 1), 2) 15% 출력 운전시 데이터

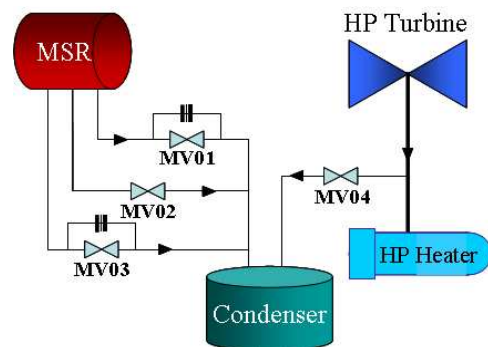


Fig. 1 Flow diagram

2.2.1 Type 1

Fig. 2는 각 배관라인별 Type 1 관로 형상일 때의 잔여수명을 예측한 결과이다. 그림에서와 같이 MV01, MV03 라인은 MV02, MV04 라인에 비해 전반적으로 잔여수명이 긴 것으로 나타났으며 일부를 제외하고 모두 20년 이상으로 계산되었다. Fig. 3은 컴포넌트별 건도를 나타낸 것이며 복수기쪽인 출구로 갈수록 건도가 뚜렷이 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 압력이 저하되어 배수되는 물이 기화되고 있음을 의미한다.

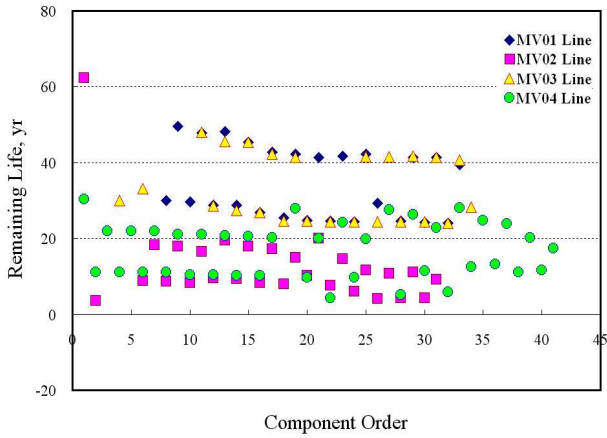


Fig. 2 Remaining life comparison for type 1 analysis

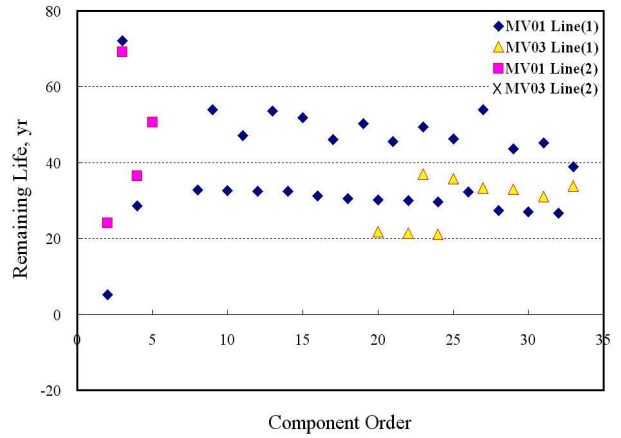


Fig. 5 Remaining lifetime comparison for type 3 analysis

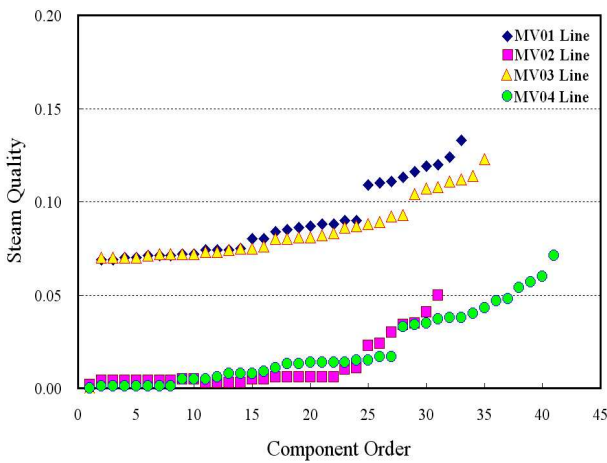


Fig. 3 Steam quality comparison for type 1 analysis

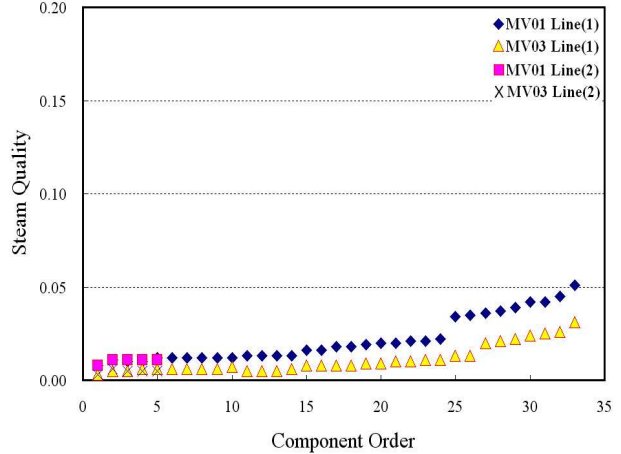


Fig. 6 Steam quality comparison for type 3 analysis

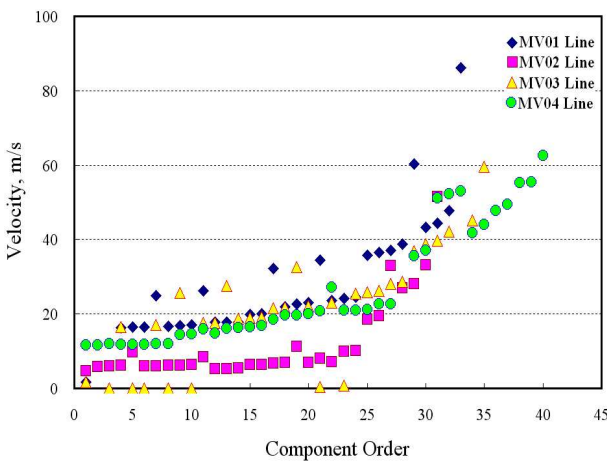


Fig. 4 Flow velocity comparison for type 1 analysis

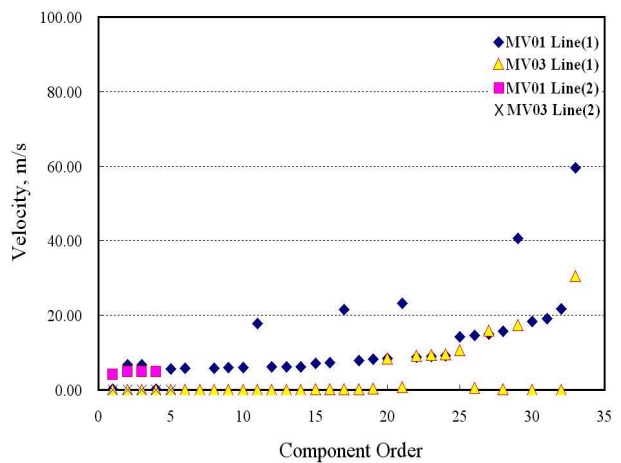


Fig. 7 Flow velocity comparison for type 3 analysis

기화로 인한 체적 증가의 영향으로 Fig. 4에서와 같이 복수기쪽 후단으로 갈수록 유속이 빨라지는 것을 볼 수 있다. 후단으로 갈수록 유속이 빨라진다는 것은 유동가속부식 관점에서 후단으로 갈수록 감속률이 증가할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 Fig. 2에서 보는 바와 같이 해석배관은 후단으로 갈수록 감속률 증가로 인해 잔여수명이 미소하게나마 저하되고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 3에서는 오리피스가 설치된 MV01, MV03 라인이 다른 라인에 비해 건도가 훨씬 높아진 것을 알 수 있다. 이는 오리피스의 영향으로 배관라인 내부에 캐비테이션이나 플래싱이 발생할 수 있다는 것을 알 수 있다.

2.2.2 Type 3

Type 3 해석은 15% 출력에서 밸브가 열려 입구측 밸브 라인과 오리피스 라인이 모두 개방되므로 두 라인 모두 유체가 흐르는 상태를 해석한 것이다. Type 3 해석은 MV01, MV03 두 라인에 대해서만 수행하였다. 나머지 라인은 운전특성상 Type 1과 같은 조건으로만 운전된다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 유동가속부식 관점에서의 잔여수명은 Type 1과 큰 차이점을 확인할 수 없다. 그러나 배관라인 후단으로 갈수록 미소하게나마 잔여수명이 짧아지고 있는 것을 확인할 수 있으나 전반적인 수명은 20년 이상으로 계산되었다. Type 3 해석은 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 배관라인 후단으로 갈수록 건도가 미소하게나마 증가하는 것을 알 수 있으며, Type 1로 해석한 Fig. 3과 비교해 볼 때 건도는 상당히 낮은 것을 알 수 있다. 여기서 알 수 있는 사실은 오리피스 라인과 밸브 라인 모두가 개방되는 15% 출력의 운전조건은 정상 출력 운전조건에 비하여 캐비테이션이나 플래싱이 발생할 가능성이 훨씬 적다는 것이다. Fig. 7에서도 Type 1에서와 마찬가지로 배수되는 물이 기화됨에 따라 후단으로 갈수록 유속이 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 유동가속부식 측면에서는 후단으로 갈수록 유속이 증가하는 영향으로 인하여 배관라인 후단으로 갈수록 감속률이 커질 수 있음을 알 수 있다.

3. 소구경 배관 열수력 해석

3.1 해석모델 구성

캐비테이션이나 플래싱의 발생여부를 검토할 수 없는 CHECWORKS 프로그램을 보완하기 위하여

FLUENT 프로그램을 이용한 열수력 해석을 수행하였다. 열수력 해석은 MV03 라인에 대하여 오리피스 라인만 운전되는 정상 출력 운전조건과 오리피스 라인과 밸브 라인이 모두 운전되는 15% 출력 운전조건 두 가지 조건에 대하여 배관 내에 캐비테이션 또는 플래싱의 발생 가능성 여부 및 유동형태를 정압 차원에서 검토하기 위한 것이다. 이에 따라 열수력 해석은 오리피스 라인만 운전되는 경우와 오리피스 라인과 밸브 라인 모두 운전되는 경우 두 가지에 대해 수행하였다. 수치해석 결과는 MV01 라인에도 동일하게 적용할 수 있다. 수치해석을 위한 경계조건은 CHECWORKS 프로그램의 열수력 해석인 NFA에서 입력한 운전조건과 동일하게 고려하였다.

Gambit 프로그램을 이용한 수치해석 격자모델 구성은 Fig. 8과 같으며 배관 컴포넌트의 격자는 경계층 영향분석 결과에 따라 혼합 사면체 유형인 Tet/Hybrid를 적용하였다. 모델 격자수는 민감도 분석결과에 따라 289,439개로 구성하였다.

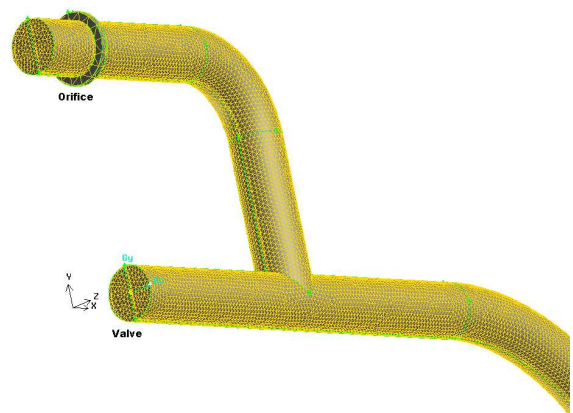


Fig. 8 Analysis mesh model

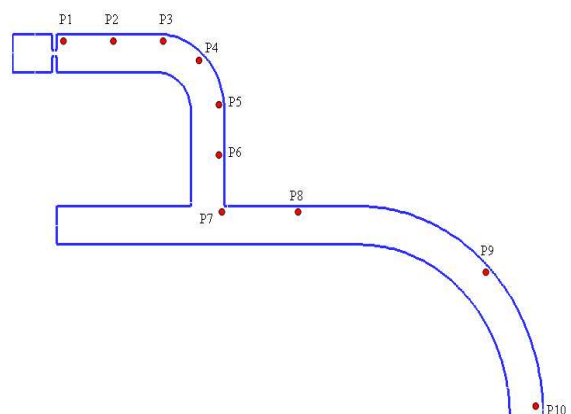


Fig. 9 Data acquisition points

난류점성 모델은 Instantaneous Navier-Stokes 식에서 유도된 RNG (ReNormalized Group) k-ε Model을 적용하였다.⁽⁴⁾ Fig. 8에서 밸브의 기능은 완전 차단 또는 열림으로 보고 경계조건을 차단과 열림 조건으로 고려함으로써 밸브는 해석 모델에서 제외하였다. 수치해석 모델에서 데이터 취득 부위는 Fig. 9와 같고 오리피스 라인과 밸브 라인이 모두 운전되는 경우로 CHECWORKS 프로그램의 Type 3 해석조건과 동일하다.

3.2 해석결과 분석

MV03 라인에 대한 두 종류의 FLUENT 해석결과를 얻었다. 즉 오리피스 라인과 밸브 라인이 모두 운전되는 경우와 밸브 라인은 닫히고 오리피스 라인만 운전되는 경우의 해석결과이다. Fig. 10, 11은 오리피스 라인과 밸브 라인이 모두 운전되는 경우의 속도분포와 정압분포를 보여준다.

Fig. 10의 속도크기(Velocity Magnitude) 분포에서 보는 바와 같이 오리피스를 나온 유동은 밸브 라인의 빠른 유속에 차단되어 크게 형성되지 못하고 있다. 이러한 유동 영향으로 두 라인이 모두 개방된 상태에서 오리피스 전후단 차압은 Fig. 11과 같이 그리 크지 않음을 알 수 있다. 또한 정압과 포화증기압을 비교한 Fig. 12와 같이 정압이 포화증기압보다 크게 형성되고 있다는 사실로부터 캐비테이션이나 플래싱 현상은 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 컴포넌트 P10 이후로는 정압이 포화증기압보다 낮아짐으로써 물이 기화되고 있음을 알 수 있다. 이는 CHECWORKS 프로그램으로 해석한 Fig. 6과도 그 결과가 일치한다. Fig 13과 14는 밸브 라인은 운전되지 않고 오리피스 라인만 운전되는 경우의 속도분포와 정압분포를 보여준다. Fig. 13의 속도크기 분포에서와 같이 오리피스를 나온 빠른 유속은 밸브 라인과 만나는 지점까지 속도가 급격히 저하된 후 일정한 유속으로 후단으로 흘러가고 있다. Fig 14의 정압분포와 같이 오리피스 전후단 차압은 상당히 큰 것을 알 수 있으며(오리피스 전단 667,523Pa, 후단 51,042.9Pa), 이로부터 오리피스 직후단에서 발생한 기포는 소멸되지 않고 하류로 계속해서 흘러가고 있음을 알 수 있다. Fig. 15의 정압과 포화증기압을 비교한 그래프에서는 Fig. 12와 달리 정압이 포화증기압보다 낮게 형성되고 있음을 알 수 있고, 이는 캐비테이션이 발생하고 있음을 암시한다. 본 열수력

해석과 동일한 조건의 CHECWORKS 운전압력 해석결과인 Fig. 16에서 보듯이 하류로 갈수록 압력이 낮아져 기포가 소멸되지 않고 그대로 흘러가는 플래싱 현상이 발생하고 있음을 알 수 있다.

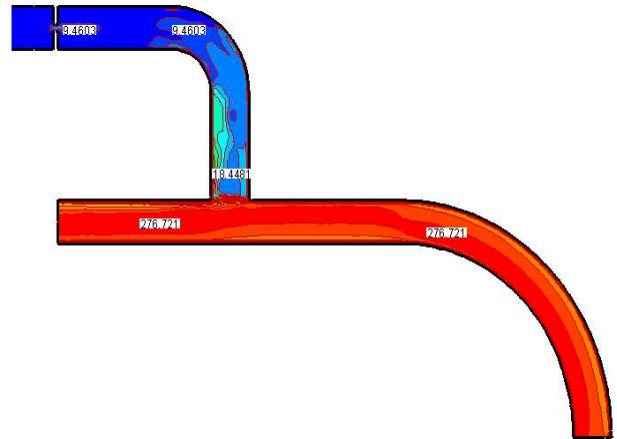


Fig. 10 Velocity magnitude distribution for valve opened condition

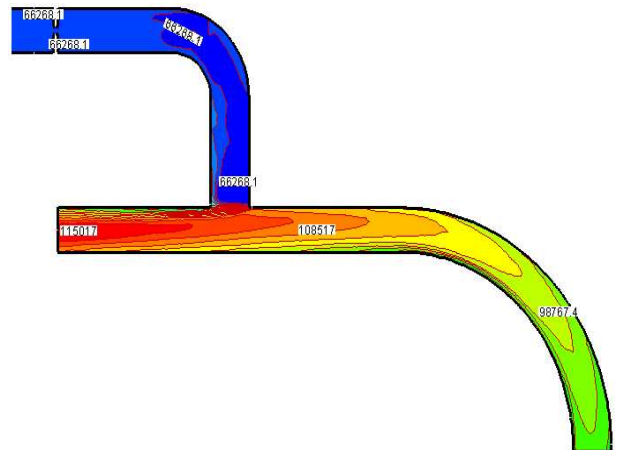


Fig. 11 Static pressure distribution for valve opened condition

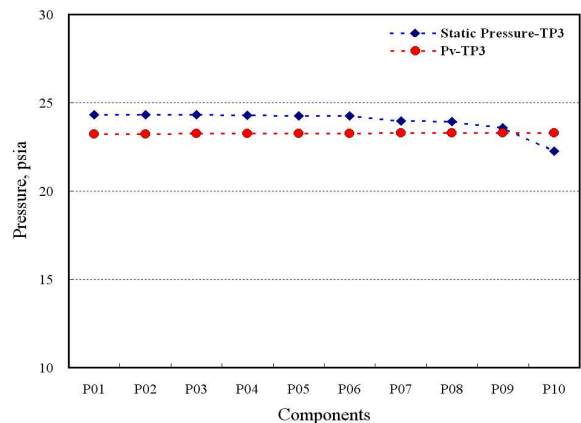


Fig. 12 Comparison of static and saturated vapor pressure (Pv)

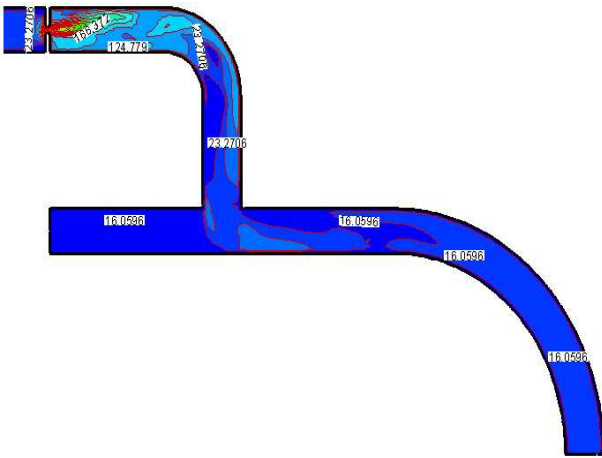


Fig. 13 Velocity magnitude distribution for valve closed condition

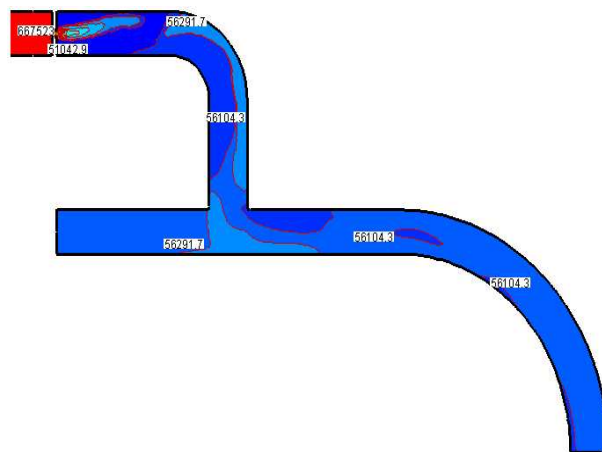


Fig. 14 Pressure distribution for valve closed condition

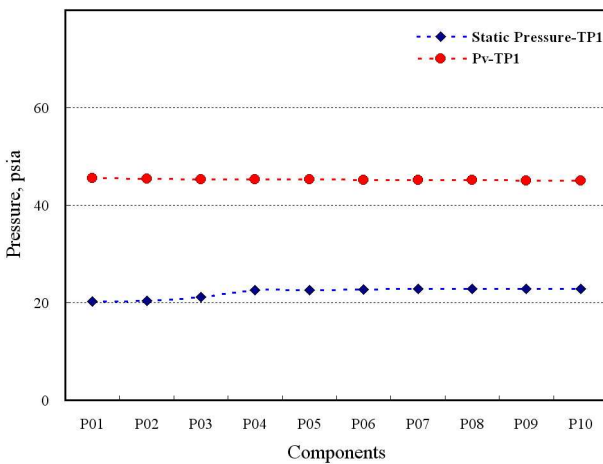


Fig. 15 Comparison of static and saturated vapor pressure (Pv)

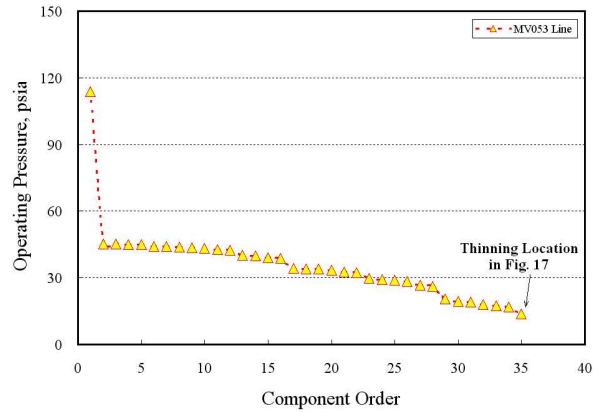


Fig. 16 Operating pressure distribution (based on CHECWORKS analysis)

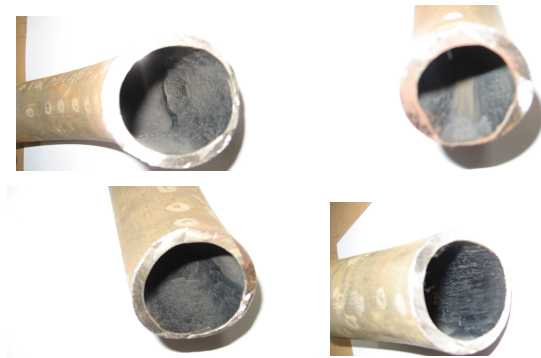


Fig. 17 Photos of wall thinning area

해석한 소구경 배관은 감속부위를 절단하여 육안검사를 수행하였다. 검사결과 배관 내부의 얇아진 부위는 모두 검은 빛깔을 띠며 울퉁불퉁한 형상으로 감속된 것으로 보아 내부에서 마그네타이트가 형성되었음을 알 수 있다. 표면이 비교적 균일하게 감속되는 FAC 영향 외에도 Erosion 현상이 복합적으로 작용한 것으로 추정된다. 또한 얇아진 부위가 모두 곡관 외호쪽인 것으로 볼 때 유체의 관성력에 의한 영향으로 추정할 수 있다.

4. 결 론

국내 특정 원전의 습분분리재열기 및 고압터빈에서 복수기로 연결되는 4개의 소구경 탄소강배관 라인을 대상으로 CHECWORKS 프로그램을 활용한 NFA 및 WRA 해석과 보완적으로 FLUENT 프로그램을 활용한 열수력 해석을 병행하여 배관감속 영향을 검토하였다. 그 결과 대상 배관라인은 운전조건에 따라 유동가속부식과 추가로 캐비테이션 및 플래싱 영향으로 감속이 가

속화되는 것으로 분석되었다. 또한 배관라인은 하류로 갈수록 기포가 많이 생겨 유체가 점차로 2 Phase로 상변화 되면서 유속이 급격히 빨라지는 현상으로 인해 배관라인 후단이 전단보다 더 많이 감육되는 것으로 나타났다. 실제 배관감육은 1 Phase보다 2 Phase 조건에서 더 심하게 발생하며 일정 유속을 초과할 경우에는 유동가속부식과 더불어 침식을 유발시킨다. 이러한 배관내의 감육영향은 FLUENT 프로그램을 통해 배관라인 내의 압력이 포화증기압 이하로 낮아지면서 캐비테이션과 플래싱이 발생하는 것을 확인하였지만 FLUENT 프로그램에 앞서 수행한 CHECWORKS 프로그램 해석결과를 이용해서도 배관 라인내의 건도, 유속 및 운전압력 비교를 통하여 충분히 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 CHECWORKS 프로그램은 소구경 탄소강 배관에 대한 감육해석 수행시 신뢰성이 떨어진다는 것으로 알려져 있으나,⁽⁵⁾ 본 검토결과에서 볼 수 있듯

이 운영자의 기술력에 따라 충분히 효과적으로 활용하여 감육을 예측하고 관리할 수 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

- (1) NRC, 1987, "Thinning of Pipe Walls in Nuclear Power Plants," *Bulletin 87-01*.
- (2) NRC, 1988, "Feedwater Line Break, Supplement 3", *Notice 86-106*.
- (3) EPRI, 2004, "CHECWORKS™ SFA", 1009600, Ver. 2.1, pp. 14-1~15-24.
- (4) D. Choudhury, 1993, "Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling," *Technical Memorandum TM-107*, Fluent Inc.
- (5) EPRI, 2006, "Recommendations for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R3)," 1011838, Final Report.