

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.4.437

수치해석 기법을 활용한 FAC 예측 프로그램 보완[§]

황경모* · 진태은* · 박 원** · 오동훈**

* 한국전력기술(주), ** 한국수력원자력(주)

Supplementation of Flow Accelerated Corrosion Prediction Program Using Numerical Analysis Technique

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 16, 2009 ; Accepted February 10, 2010)

Key Words: Flow Accelerated Corrosion(유동가속부식), Wall Thinning(감육), CHECWORKS

초록: 고온, 고압의 유체가 흐르는 탄소강 배관에서는 유동가속부식으로 인한 배관감육 현상이 발생할 수 있다. 화력 및 원자력발전소에서 유동가속부식으로 인한 배관 손상시 고비용의 보수와 발전 정지를 유발할 뿐 아니라 발전소 신뢰도 및 안전성에 영향을 미칠 수도 있다. CHECWORKS 프로그램은 국내 발전소에서 유동가속부식에 의한 배관 손상을 예방하기 위하여 배관 두께검사 데이터를 평가하고 검사 계획을 수립하는데 이용되어 왔다. 그러나 상기 프로그램은 원전 2차측 배관 모듈을 데이터베이스화한 후에 배관라인 그룹별로 유동가속부식 손상을 예측하기 때문에 국부적으로 감육에 민감한 부위를 찾는 데 어려움이 있다. 본 논문에서는 CHECWORKS 프로그램을 이용하여 해석을 수행하고 수치해석을 통하여 검증할 수 있는 방법론을 기술하였다. 또한 국내 원전 2개의 배관 라인그룹에 대하여 CHECWORKS 프로그램을 이용한 유동가속부식 민감 부위를 FLUENT를 이용한 수치해석 결과와 비교하였다.

Abstract Flow-accelerated corrosion (FAC) leads to thinning of steel pipe walls that are exposed to flowing water or wet steam. From experience, it is seen that FAC damage to piping at fossil and nuclear plants can result in outages that require expensive repairs and can affect plant reliability and safety. CHECWORKS have been utilized in domestic nuclear plants as a predictive tool to assist FAC engineers in planning inspections and evaluating the inspection data so that piping failures caused by FAC can be prevented. However, CHECWORKS may be occasionally ignore local susceptible portions when predicting FAC damage in a group of pipelines after constructing a database for all the secondary side piping in nuclear plants. This paper describes the methodologies that can complement CHECWORKS and the verifications of CHECWORKS prediction results using numerical analysis. FAC susceptible locations determined using CHECWORKS for two pipeline groups of a nuclear plant was compared with determined using the numerical-analysis-based FLUENT.

1. 서 론

원전 2차측의 탄소강으로 제작된 기기 및 배관 내에 고온의 유체가 흐르면 유동가속부식(FAC)에 의한 감육(Wall Thinning) 현상이 나타나고 결국에는 기기의 압력경계 부분이 파열되는 사고가 발생할 수도 있다. 유동가속부식으로 인한 미국의 Surry 2호기 급수관 파열사고^(1,2)와 일본 미하마 3호기에서 발생한 복수관 파열사고⁽³⁾ 여파로 각국의 규제기관에서는 유동가속부식으로 인한 감육관리를 보다 더

엄격히 규제하고 있다. 이러한 유동가속부식을 관리하기 위한 예측프로그램으로서 미국과 한국을 포함한 세계 다수의 국가에서는 CHECWORKS 프로그램을 운용하고 있다. CHECWORKS 프로그램은 원전 2차측 배관 전체를 데이터베이스화하고 배관 개소별로 감육을 예측하기 때문에 배관라인이 복합적으로 연결된 일부 라인에 대해서는 국부적으로 발생하는 난류에 의한 감육 민감부위를 누락하는 경우가 발생할 수도 있다.

이에 따라 본 논문에서는 CHECWORKS 프로그램으로 예측한 감육 민감부위를 수치해석으로 보완할 수 있는 방안에 대하여 기술하였다. 이를 위하여 국내 특정 원전의 2개 배관라인 그룹을

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

† Corresponding Author, hkm@kopec.co.kr

대상으로 CHECWORKS 프로그램 모델을 구성한 후 감육률을 예측하고, 동일한 배관라인 그룹에 대하여 수치해석 모델을 구성한 후 해석결과에 따른 감육 민감부위를 상호 비교하였다.

2. 감육예측 모델구성 및 해석

2.1 감육예측 모델 구성

배관감육은 고온, 고압의 물이나 2상의 증기가 흐르는 탄소강 배관이 내부에서부터 얇아지는 현상을 의미하며, 용존산소, pH 등의 화학적 인자와 유체 유동에 의해 가속되는 부식의 한 형태로서 이를 유동가속부식이라 한다. CHECWORKS 프로그램은 배관라인을 구성하고 있는 개별 컴포넌트(예, 엘보우, 티, 직관 등)의 설계 데이터와 수화학 데이터, 운전주기, 열수력 데이터 등의 운전 변수를 바탕으로 수화학해석(WCA : Water Chemistry Analysis), 열수력해석(NFA : Network Flow Analysis) 및 감육해석(WRA : Wear Rate Analysis)을 단계적으로 수행하여 감육률과 잔여수명 등을 결정할 수 있는 프로그램이다.

감육해석을 수행하기 위해서는 CHECWORKS 프로그램에 내재된 각종 기능을 활용하여 열평형도(Heat Balance Diagram) 작성 및 배관라인 3차원화(Connectivity)를 우선적으로 수행해야 하며, 열수력 데이터, 수화학 데이터, 운전주기, 운전시간 등이 DB로 구축되어 있어야만 최종적으로 감육해석이 수행된다.⁽⁴⁾

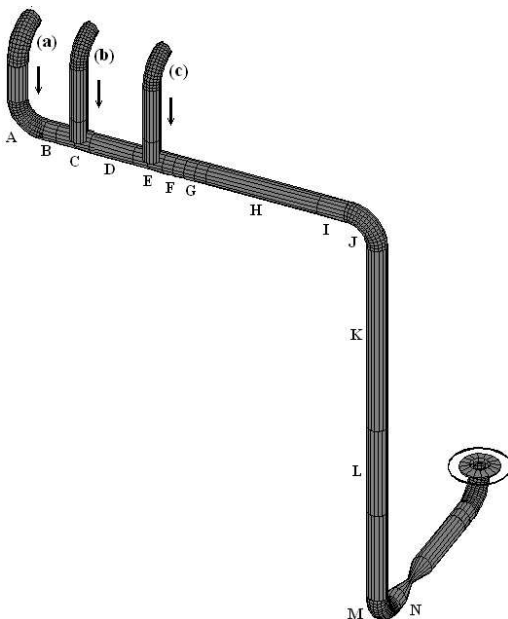


Fig. 1 Model A

본 논문에서는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 3개 배관라인이 하나로 합쳐지는 배관라인 그룹과(모델 A), Fig. 2와 같이 2개의 배관라인이 하나로 합쳐진 후 확장되는 배관라인 그룹(모델 B)에 대하여 CHECWORKS 해석모델을 구성하였다. 모델 A에서 주배관(a)은 내경 0.281m이고 티로 연결된 가지배관 (b)와 (c)의 내경은 모두 0.237m이다. 모델 B에서 배관라인 (a)와 (b)의 내경은 모두 0.189m이고 확관을 지난 후에는 내경 0.281m이다.

Fig. 1과 2는 CHECWORKS 프로그램에 내재된 Connectivity 기능을 이용하여 배관라인을 3차원화한 그림이다. 그림에서 A, B, C 등은 해당 부위의 위치를 나타낸다. 모델 A와 B에 대한 CHECWORKS 해석조건은 Table 1과 같으며, 실제 운전조건을 나타낸다.

Table 1 Analysis Conditions

Models	Items	Units	Values
A	Temperature	°C	101.5
	Pressure	Pa	7.0×10^5
	Velocity of (a)	m/s	0.323
	Velocities of (b) & (c)	m/s	1.706
	Density	kg/m ³	957.31
	Viscosity	Pa-s	8.5×10^{-5}
B	Temperature	°C	309.9
	Pressure	Pa	9.9×10^6
	Velocity of (a) & (b)	m/s	1.513
	Density	kg/m ³	690.97
	Viscosity	Pa-s	2.5×10^{-5}

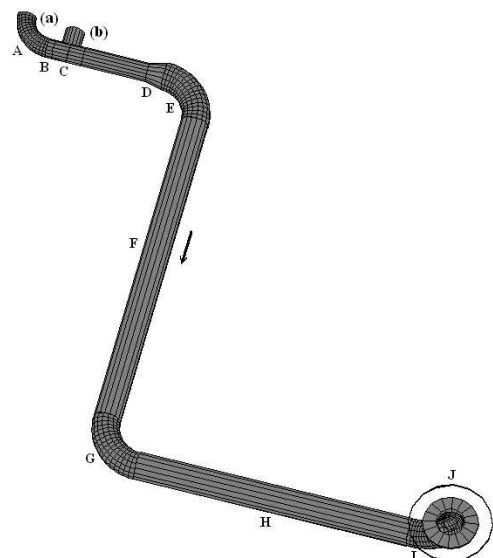


Fig. 2 Model B

2.2 감육해석 및 결과토의

CHECWORKS 프로그램에서 감육해석은 3단계로 수행된다. 먼저 입력된 열수력 데이터와 발전소의 2~3개소에서 채취되는 수화학 데이터를 입력하여 수화학해석을 수행하면 열평형도 상에 존재하는 전체 라인에 대한 수화학 값이 계산된다. 계산되는 정보는 pH, 아민, 용존산소농도 등이다. 상(Phase)이 변하는 배관라인 그룹에 대해서는 열수력해석을 수행한다. 열수력해석 결과로는 건도, 압력, 엔탈피, 손실계수(Loss Coefficient) 등이 계산된다. 이와 같이 수화학해석과 열수력해석에서 계산된 정보는 CHECWORKS 프로그램에 컴포넌트 단위로 저장되며, 계산결과로 구해진 데이터는 모두 감육해석에 반영되어 개별 컴포넌트에 대한 감육률과 잔여수명 등이 계산된다. 수화학해석과 열수력해석을 수행하지 않더라도 각 배관라인에 대한 정보를 알 수 있다면 ARD(Advanced Run Definition) 기법을 이용하여 감육해석을 수행할 수도 있다.

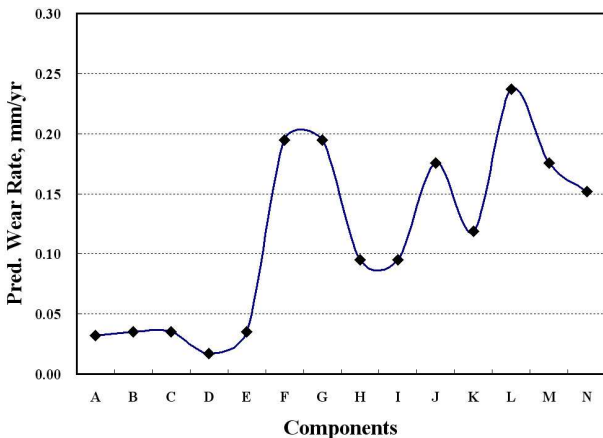


Fig. 3 WRA Results for Model A

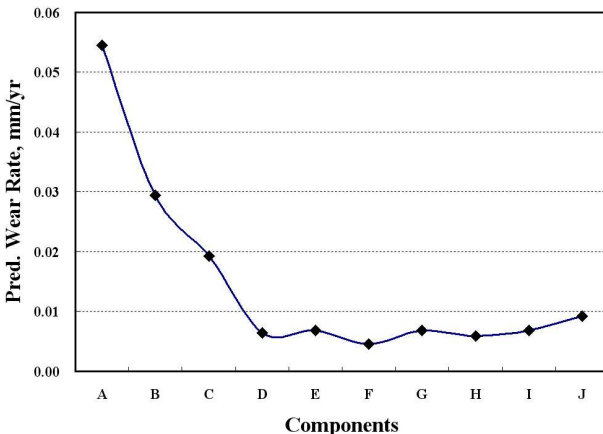


Fig. 4 WRA Results for Model B

상기와 같은 절차에 따라 모델 A와 B에 대하여 해석한 결과는 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 제시하였다. Fig. 3과 Fig. 4의 가로축은 Fig. 1과 Fig. 2에서 나타낸 위치를 의미하며, 세로축은 프로그램 상에서 해당부위의 난류특성과 수화학 및 기하학적 형상에 따라 결정되는 예측 감육률(Pred. Wear Rate)을 나타낸다. Fig. 3의 모델 A에서 감육률이 상대적으로 크게 계산된 부위는 F, G, J 및 L이다. Fig. 4의 모델 B에서는 부위 A에서의 감육률이 가장 크게 계산되었고, 부위 B, 부위 C의 차례로 감육률이 점차 줄어드는 것으로 계산되었다.

3. 수치해석 모델구성 및 해석

3.1 수치해석 모델구성

수치해석 모델 구성은 Gambit 프로그램을 이용하였다. 수치해석 모델은 Fig. 1 및 Fig. 2와 동일하기 때문에 모델 그림은 제시하지 않는다. 수치해석을 위한 배관 컴포넌트의 격자는 경계층 영향분석 결과에 따라 혼합 사면체 유형인 Tet/Hybrid를 적용하였으며, 격자 민감도 분석결과에 따라 모델 A는 855,934개 그리고 모델 B는 861,548개의 격자로 구성하였다. 수치해석은 정상상태 조건으로 수행하였으며, 난류점성 모델은 Instantaneous Navier-Stokes 식에서 유도된 RNG (ReNormalized Group) $k-\epsilon$ Model을 적용하였다.⁽⁵⁾ 근접벽 처리(Near Wall Treatment) 방식은 가장 일반적으로 적용되는 Standard Wall Function을 적용하였으며, 입력 경계조건으로 사용되는 입구 유속은 균일속도 조건을 적용하였다. 해석에 적용한 유체조건과 물성치는 Table 1에 제시한 조건과 동일하다.

3.2 수치해석 및 결과토의

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 모델 A와 B에 대하여 수치해석을 수행한 결과로서 정압분포를 보여준다. 또한 수치해석 결과 데이터를 계산한 부위도 함께 제시하였다. 모델 A와 B에서 유체가 들어오는 입구측에는 유체간섭 작용으로 인하여 압력이 높게 형성되고 티 배관 오른쪽 상단부에는 유체의 관성으로 인하여 압력이 낮게 형성되고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 7부터 9까지는 모델 A에 대한 수치해석 결과로서 난류운동에너지(TKE, Turbulent Kinetic Energy), 난류강도(TI, Turbulence

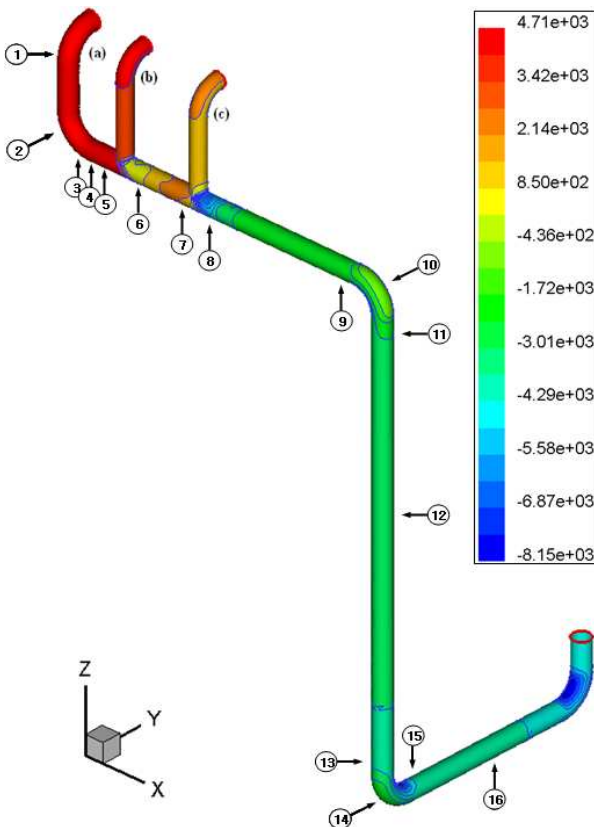


Fig. 5 Static Pressure Profile and Calculation Points for Model A

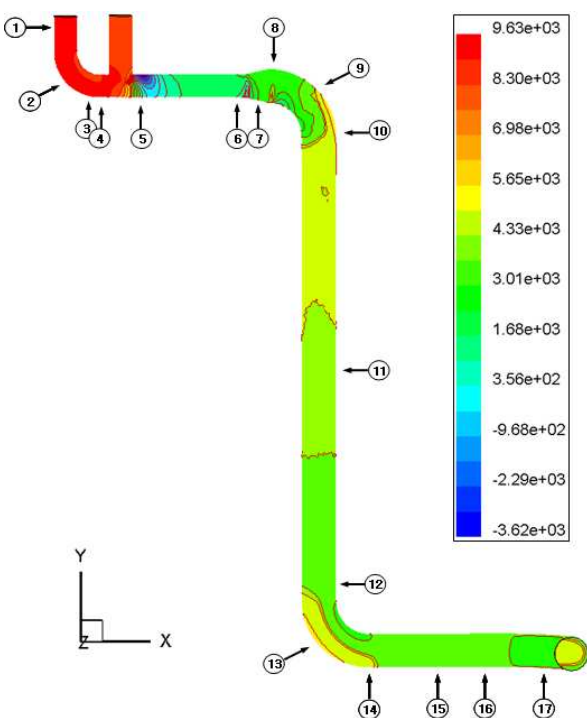


Fig. 6 Static Pressure Profile and Calculation Points for Model B

Intensity) 및 반경방향 국부유속(V_r)을 나타낸다. 배관 벽면에서는 이론적으로 유체가 정체되기 때문에 배관 반경의 95%에서 계산한 데이터를 활용하였다. 해당 부위는 난류심(Turbulent Core)과 점성부층(Viscous Sub-layer) 바깥의 완충영역(Buffer Zone) 사이이다. 선행 연구에서 난류운동 에너지와 난류강도는 배관내부의 난류발생 정도를 나타내기 때문에 배관 내부에서 국부적으로 발생하는 감속발생 위치와 직접적인 영향이 없고 유체가 배관벽면을 향하는 반경방향 유속(V_r)이 가장 밀접한 연관이 있는 것으로 제시하고 있다.⁽⁶⁻⁸⁾ 즉, 배관감속에 영향을 미치는 유동가속부식은 배관의 형상에 좌우되며, 선행 연구에서는 이를 계수로 구분하여 배관벽면에 수직으로 부딪치는 유로형상을 가장 큰 값인 1.0으로 하여 배관감속 예측 이론에 반영하고 있다. Fig. 7부터 12에서 Upper, Side 및 Under는 상단 수평배관을 기준으로 하여 위쪽과 측면 및 아래쪽을 나타낸다. Fig. 7부터 9에서 볼 수 있듯이 위치 6번부터 난류강도 및 난류운동에너지가 크게 계산되고 이후까지 지속되고 있는 것을 알 수 있다. 반면에 벽면을 향하고 있는 반경방향 유속은 6번부터 10번까지가 크게 나타나고 이후는 현저하게 저하되고 있는 것을 알 수 있다. 6번과 8번 부위는 티배관에서 들어온 유체의 관성으로 인하여 배관벽면으로 역류하고 9번과 10번 부위는 상류에서 발생한 유체의 난류가 엘보우에까지 영향을 미치고 있기 때문이다.

Fig. 10부터 12까지는 모델 B에 대한 난류운동 에너지, 난류강도 및 반경방향 국부유속을 나타낸다. 모델 B의 경우에는 4번부터 10번 부위까지 난류운동에너지, 난류강도 및 반경방향 국부유속이 모두 크게 계산되었다. 이는 전단의 두 배관에서 들어온 유체가 혼합되고 기하학적 형상에 따라 발생한 난류영향인 것으로 확인되었다.

4. 감속해석 및 수치해석 결과 비교

모델 A와 B에 대한 CHECWORKS 해석결과, 모델 A에서는 좌측부터 6, 7, 10 및 12번째 부위인 F, G, J, L에서 감속률이 크게 계산되었다. 반면에 수치해석에서는 6번부터 10번 사이(Fig. 5 및 9 참조)에서 감속에 민감한 것으로 나타났다.

이 부위는 Fig. 1에서 부위 C, E 및 J에 해당하며, 그 중에서도 배관 측면과 하단부가 상부보다

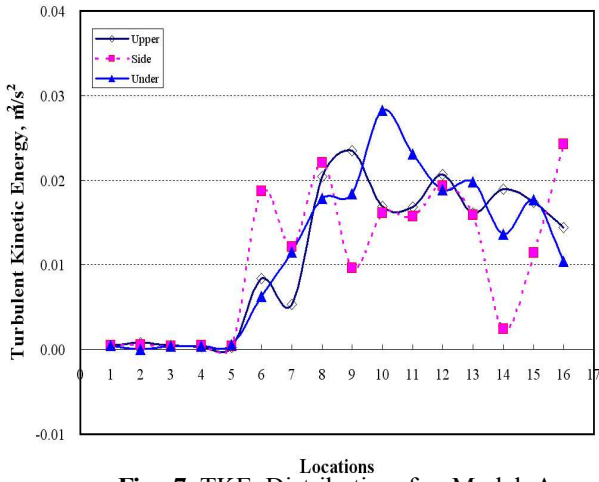


Fig. 7 TKE Distribution for Model A

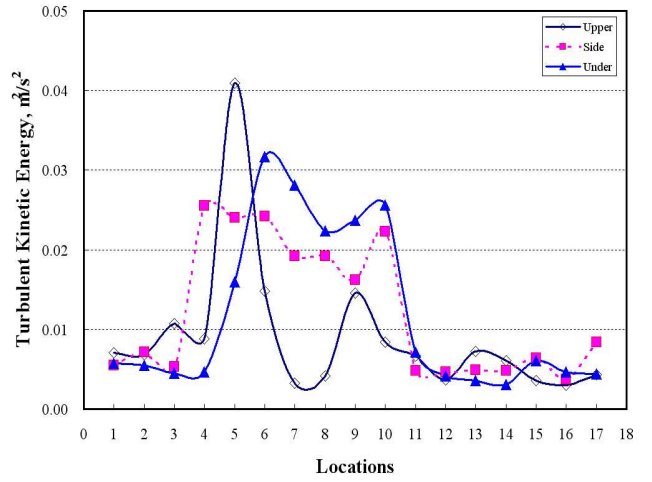


Fig. 10 TKE Distribution for Model B

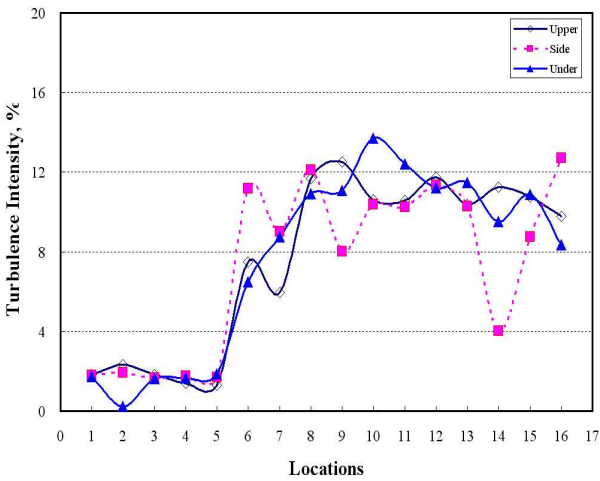


Fig. 8 TI Distribution for Model A

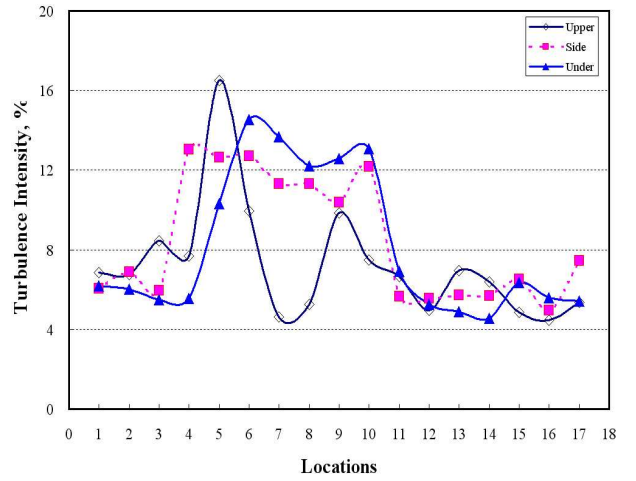


Fig. 11 TI Distribution for Model B

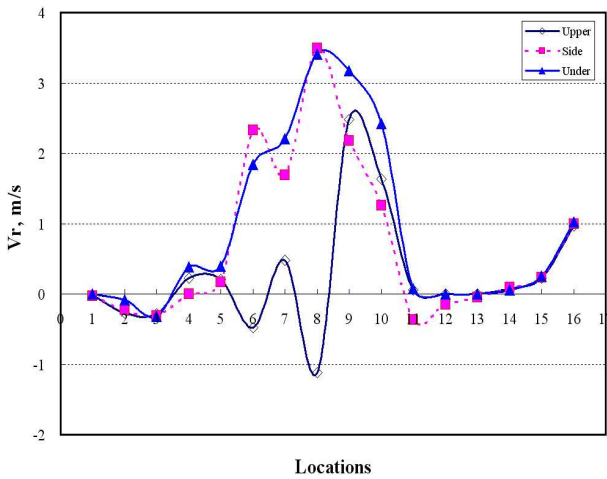


Fig. 9 Vr Distribution for Model A

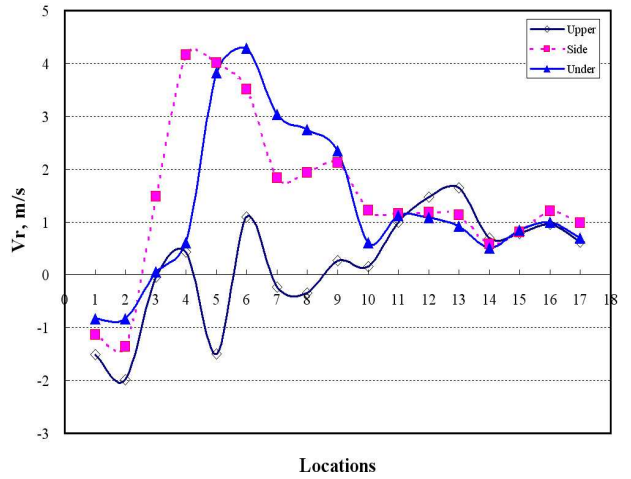


Fig. 12 Vr Distribution for Model B

감육에 더 민감한 것으로 나타났다. 이는 유체가 배관벽면을 수직으로 타격할 경우에 나타나는 유체의 관성력과 농도차에 의한 물질전달 증가로 배관감육의 매개체인 마그네타이트의 용해가 더 빨라지기 때문이다.

모델 B에서는 부위 A의 감육률이 가장 크게 계산되었고, 그 다음 부위 B, C의 차례대로 감육률이 점차 줄어드는 것으로 계산되었다. 반면에 수치해석에서는 4번부터 10번 사이(Fig. 6 및 12 참조)에서 감육에 민감한 것으로 나타났다. 이 부위는 Fig. 4의 부위 C, D 및 E가 해당되며, 그 중에서도 배관 측면과 하단부가 상부보다 감육에 더 민감한 것으로 나타났다.

이러한 결과가 나타난 이유는 CHECWORKS 프로그램이 다중으로 연결된 배관라인의 형상에 따른 난류현상과 국부적으로 발생하는 와류의 영향을 적절히 반영할 수 없기 때문인 것으로 판단된다. CHECWORKS 프로그램은 자체 컴포넌트와 상류에 설치된 컴포넌트, 즉 2개의 컴포넌트 형상에 따른 난류영향을 특정 수치로 반영하도록 설계되어 있으나 다중으로 설치되어 복잡한 구조를 갖는 배관라인 그룹에 대한 감육률 해석에는 상기와 같은 제약이 있다. 이에 따라 복잡한 구조를 갖고 있는 배관라인에 대해서는 수치해석 방법을 적용하여 CHECWORKS 프로그램을 보완할 경우 보다 정확한 감육 민감부위 예측으로 발전소 배관의 안전성 향상에 도움이 될 것으로 판단된다.

5. 결론

발전소에서 다소 복잡하게 구성된 탄소강 재질의 배관라인 그룹 2개를 대상으로 CHECWORKS 감육해석을 수행하고 동일한 모델에 대하여 FLUENT 코드로 수치해석을 수행하였다. 이는 CHECWORKS 프로그램에서 나타날 수 있는 제약사항을 수치해석으로 보완할 수 있는 방법론을 검토하기 위함이었다.

그 결과 CHECWORKS 프로그램으로 해석한 결과에 따라 감육에 민감한 것으로 도출된 컴포넌트를 수치해석 방법을 통하여 충분히 보완할

수 있는 것으로 나타났다. 또한 CHECWORKS 프로그램으로 확인하기 어려운 국부감육 부위도 수치해석적으로 판별해 낼 수 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 일부 복잡한 구조를 갖고 있는 배관라인 그룹에 대하여 수치해석 방법을 적용하여 CHECWORKS 프로그램을 보완할 경우, 감육예측 프로그램에서 간과할 수도 있는 감육 민감 컴포넌트 및 국소부위를 보다 더 주의 깊게 관리할 수 있는 등 발전소 배관의 안전성 향상에 크게 도움이 될 것으로 판단된다.

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) Maeda and Amano, 2004, "Automatic Shutdown of Unit 3, 4th Report," NISA/METI Press Release.
- (4) EPRI, 2004, "CHECWORKSTM Steam Feedwater Application," 1009600, Ver. 2.1.
- (5) D. Choudhury, 1993, "Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling," Fluent Inc., Technical Memorandum TM-107.
- (6) H. Keller, 1978, "Corrosion and Erosion Problems in Saturated Steam Turbines," AIM Conf., Liege, Belgium, pp. 22~28.
- (7) K. M. Hwang, W. Lee, T. E. Jin, and K. H. Kim, 2008, "A Study on the Shell Wall Thinning Causes Identified Through Experiment, Numerical Analysis and Ultrasonic Test High Pressure Feedwater Heater," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, Issue 1, pp. 25~32.
- (8) K. M. Hwang, T. E. Jin, and K. H. Kim, 2008, "A Study on Wall Thinning Causes Identified through Experiment, Numerical Analysis and Ultrasonic Test of Main Feedwater Isolation Valve," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 45, No. 1, pp. 1~7.