

배관감육관리에 활용되는 CHECWORKS 프로그램의 열수력해석 방법론 검증에 관한 연구

서혁기[†] · 황경모

경기도 성남시 분당구 구미로8 M-Tower 빌딩 801호, 463-870, 한국전력기술(주)
(2012년 10월 12일 접수, 2013년 04월 24일 수정, 2013년 04월 25일 채택)

A Study on the Verification of Network Flow Analysis Methodology of CHECWORKS Program used in Pipe Wall Thinning Management

Seo Hyuk Ki[†] and Hwang Kyeong Mo

Bundang M-TOWER, 8 Gumi-dong, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 463-870, KEPCO E&C, Republic of KOREA
(Received October 12, 2012; Revised April 24, 2013; Accepted April 25, 2013)

In general, pipelines at nuclear power plants are affected by various types of degradation mechanisms and may be ruptured after gradually thinning. FAC (Flow-Accelerated Corrosion) is typical aging mechanism affecting the secondary side piping system. In Korea nuclear power plants, CHECWORKS program have been used for management of wall thinning damages. However, sometimes, CHECWORKS program shows wrong results at the stage of NFA (Network Flow Analysis) in case of complex pipelines. This paper describes the calculation results of pressure drop in a complex pipeline and single line by using the CHECWORKS program and the analysis results are compared with those of engineering calculation results including errors between them.

Keywords : Flow-Accelerated Corrosion(FAC), CHECWORKS, Network Flow Analysis(NFA), Wear Rate Analysis(WRA), Wall Thinning

1. 서론

고온, 고압으로 운전되고 있는 원전의 탄소강 배관에서는 유동가속부식(Flow Accelerated Corrosion, FAC)으로 인한 배관감육이 발생하고, 이것은 손상으로 이어지기도 한다. 국내에서는 FAC에 의한 배관감육 손상을 관리하기 위해 미국의 CHECWORKS 프로그램을 도입하여 운영하고 있다. CHECWORKS 프로그램을 이용한 감육해석 과정 중 배관 내부의 유동조건을 확인하기 어려운 일부라인에 대해서는 별도로 열수력해석(Network Flow Analysis, NFA)을 수행하여 감육해석에 필요한 운전변수를 미리 계산한다. 각 배관의 감육률과 잔여수명은 이렇게 계산된 운전변수를 근거로 Wear Rate Analysis(WRA)를 수행하여 계산된다. 단순한 배관라인에 대해서는 그 결과가 실제와 일치하지만 배관 설치형태가 복잡한 일부 라인에 대해서는 CHECWORKS 프

로그래의 NFA단계에서 잘못된 결과를 제시하는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 단일라인의 배관과 복잡한 구조의 배관라인을 대상으로 CHECWORKS 프로그램의 NFA 해석 결과와 공학적으로 계산한 결과를 비교하여 문제점을 제시하였다.

2. 공학적 해석 이론

열수력 해석을 공학적으로 계산하기 위하여 활용한 식은 Energy Equation과 Darcy Equation, 그리고 그 외 연립방정식들이다. 아래의 식들에 대한 설명은 일반 공학적 문헌에 잘 제시되어 있으므로 본 논문에서는 생략한다.

Energy Equation

$$\dot{Q}_{netin} + \dot{W}_{shaft,netin} = \frac{d}{dt} \int_{CV} e \rho dV + \sum_{out} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_{in} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad (1)$$

[†] Corresponding author: hkseo@kepc-enc.com

Darcy Equation

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

Simultaneous Equation

$$h_{L, total} = \sum_i f_i \frac{L_i}{D_i} \frac{V_i^2}{2g} + \left(\sum_j K_j \right) \frac{V_j^2}{2g} \quad (3)$$

$$Q = AV \quad (4)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (5)$$

식 (1)에서 \dot{Q} 는 검사체적으로 전달된 열량이고, \dot{W} 는 축일을 의미하지만 논문에서 다루는 라인에서는 이 두 변수가 존재하지 않기 때문에 모두 0이 된다. 또한, e 는 단위질량당 총 에너지를 나타내지만 정상유동에서 에너지의 시간변화율은 0이기 때문에 우변의 첫 번째 항도 사라진다. 그리고 h 는 엔탈피를 나타낸다. 식 (2)에서 ε 은 배관 내부의 거칠기를 의미하고, f 는 Darcy 마찰계수이다. 수식이 음함수 형태이므로 Moody Chart를 통해 초기 마찰계수를 구하고 이 값으로 마찰계수 값이 특정값에 수렴할 때까지 반복계산을 수행하여 최종 마찰계수를 구한다. 식 (3) 첫 번째 수식에서 h_L 은 배관에서 발생하는 수두손실이고, K 는 손실계수를 나타낸다. 아래 첨자 i 는 직경이 동일한 직관의 배관 구간을 의미하고 j 는 부차적 손실을 유발하는 부품들을 의미한다.

3. CHECWORKS와 공학적 해석 결과 비교

본 단락에서는 CHECWORKS 프로그램에서 수행하는 열수력해석 결과가 어느 정도의 정확성을 갖고 있는지를 분석

한 결과를 제시하였다. 분석은 단일 배관라인과 복잡한 구조의 배관라인을 대상으로 수행하였으며 CHECWORKS 프로그램으로 수행한 열수력해석 결과를 공학적으로 계산한 결과와 비교하였다.

3.1 단일 배관라인

Fig. 1은 단일 배관라인을 계산하기 위해 CHECWORKS 프로그램으로 모델링한 그림이다. 해당 모델의 공학적 계산에는 앞 단락에서 기술한 이론식들을 적용하였다. CHECWORKS의 NFA 분석에는 입구 조건, 출구조건, 유량 중에서 두 가지 이상의 값을 경계조건으로 입력하도록 되어있다. 본 논문에서는 입구 조건과 출구 조건을 경계조건으로 하는 배관라인에 대하여 해석 및 계산한 결과만을 제시하였으나 다른 조건에 대해서도 정확도는 충분한 신뢰성을 갖고 있는 것으로 확인되었다. Table 1은 계산에 적용한 물성치를 보여준다. 여기서 손실계수(Loss Coefficient)는 Idel'cik이 제시한 값을 사용하였다. 배관 내부 유동은 정상상태 및 단상조건이며 흐름 중에 상변화는 발생하지 않는다. Table 2는 각 배관의 압력값에 대하여 CHECWORKS 프로그램의 해석결과와 공학적 계산결과를 비교한 결과이며 Fig. 2는 이를 그래프로 나타낸 그림이다. Fig. 2에서 사각형 표시의 검은색 점선으로 나타낸 부분이 공학적으로 계산한 결과이고 원형 표시의 실선이 CHECWORKS 결과이다. Table 2와 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 CHECWORKS 프로그램을 이용한 해석결과와 공학적 계산결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 CHECWORKS 프로그램에서 전체 유량 및 각 배관에서 압력을 계산하는 방법은 앞에서 제시한 공학적 이론식과 동일하게 계산한 것으로 판단된다.

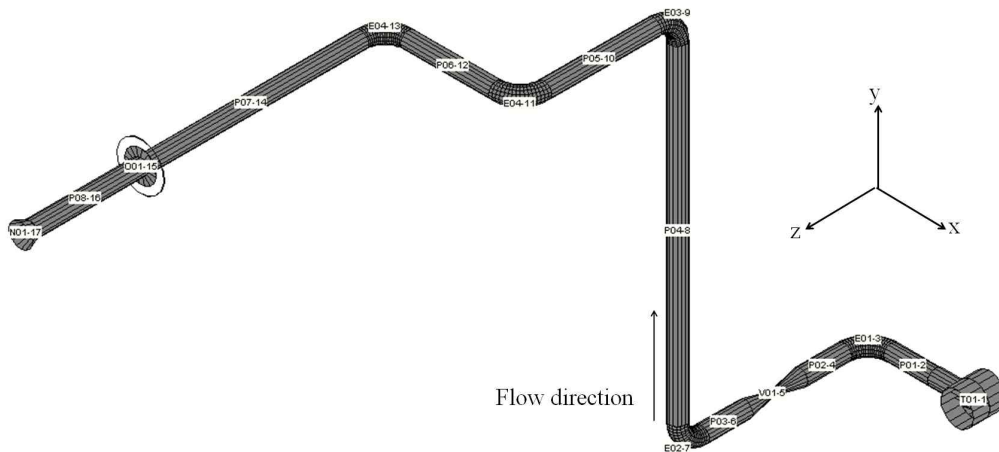


Fig. 1. Analysis model for single flow line.

Table 1. Properties of single flow line

Items	Value	Unit
Total loss coefficient	36.747	-
Temperature	165.2	C
Density	903.28	kg/m ³
Dynamic Viscosity	0.164	cP
Source Pressure	2.26	MPa
Sink Pressure	1.89	MPa
Δheight	4.6	m
Roughness(ε)	0.046	mm

Table 2. Results of CHECWORKS and engineering calculation

	CHEC.	Eng'g Calc.
Total Flow rate(kg/s)	127.8052	127.8135
Component output result(MPa)		
Components	CHEC.	Eng'g Calc.
Inlet Pressure	2.2600	2.2600
T01-1	2.2529	2.2529
P01-2	2.2525	2.2525
E01-3	2.2505	2.2505
P02-4	2.2502	2.2502
V01-5	2.2086	2.2086
P03-6	2.2083	2.2082
E02-7	2.2063	2.2063
P04-8	2.1631	2.1630
E03-9	2.1611	2.1610
P05-10	2.1602	2.1601
E04-11	2.1583	2.1582
P06-12	2.1575	2.1574
E04-13	2.1556	2.1555
P07-14	2.1537	2.1536
O01-15	1.8987	1.8988
P08-16	1.8979	1.8979
N01-17	1.8900	1.8900

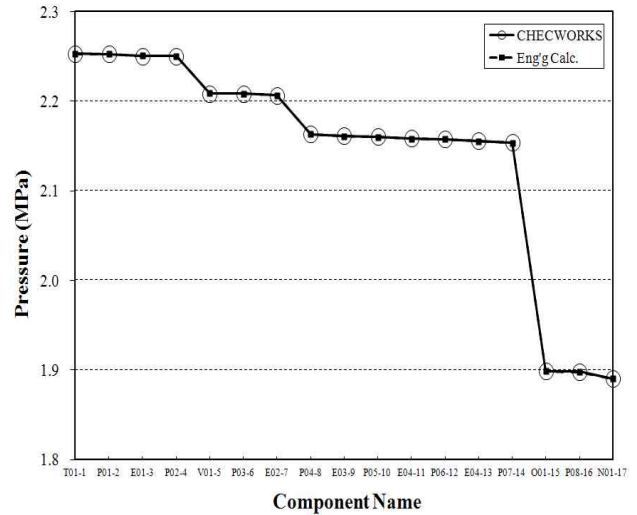


Fig. 2. Comparison between CHECWORKS and engineering calculation.

3.2 다중연결 배관라인

CHECWORKS 프로그램을 이용하여 복잡한 배관을 해석할 경우 배관라인의 형태를 프로그램이 분류해 놓은 9가지 Type에 맞추어 해석을 수행하여야 한다. Fig. 3은 CHECWORKS에서 제시하는 배관라인의 Type을 나타낸 그림이다. 그러나 실제 현장의 배관라인 형태는 프로그램이 정해놓은 Type과 다른 경우가 많다. 따라서 실제 현장의 배관라인을 해석할 때 강제로 프로그램의 Type에 맞추어 해석을 진행하면 오차가 발생할 가능성이 있다. 이러한 오차를 확인하기 위하여 Fig. 4와 같은 배관라인에 대하여 공학적 계산을 수행하였다. Fig. 4는 여러 개의 분기배관으로부터 나온 유체가 공통 모관에서 합쳐진 후 복수기 쪽으로 흘러가는 복잡한 배관라인을 CHECWORKS 프로그램으로 모델링한 그림이다. 각 배관의 압력과 유량을 계산하기 위하여 Branch를 나누고 각각의 Branch마다 방정식을 적용하였다. 열수력해석을 수행하기 위한 유체의 운동특성으로서 Branch 1부터 4까지의 배관에서 유체가 유입되고 Branch 5를 통하여 나간다. Table. 3은 열수력해석을 수행하기 위한 배관의 운전조건이다. Table 3에서 볼 수 있듯이 Branch 1부터 4까지 입구 압력과 Branch 5에서 출구압력을 알고 있는 조건이다. 단일 배관과 동일하게 내부 유동은 단상, 유동 중 상변화는 없으며 손실계수는 Idel'cik이 제시한 값을 사용하였다.

Table. 4는 Fig. 4의 모델을 대상으로 CHECWORKS 및 공학적 계산결과를 비교하여 나타낸 표이다. Table 4에서 컴포넌트 이름의 첫 번째 문자 T, E, P는 각각 T자관, 엘보우, 직관을 나타낸다. 그리고 D/S는 T자관의 하류쪽을 의미하고 Br은 가지부를 나타낸다. 먼저 CHECWORK로 계산한 결과를 살펴보면 유입된 유체가 각 Branch를 빠져나오면서

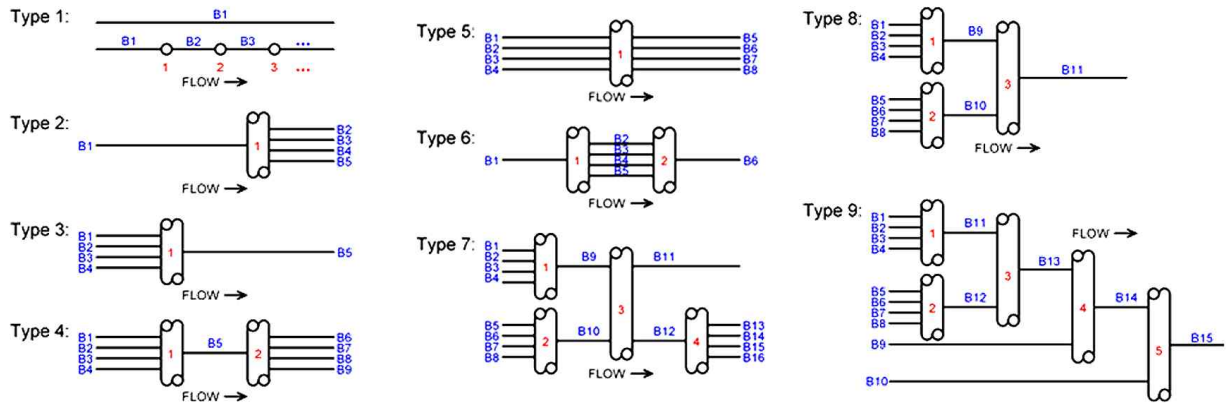


Fig. 3. Line type of analysis.

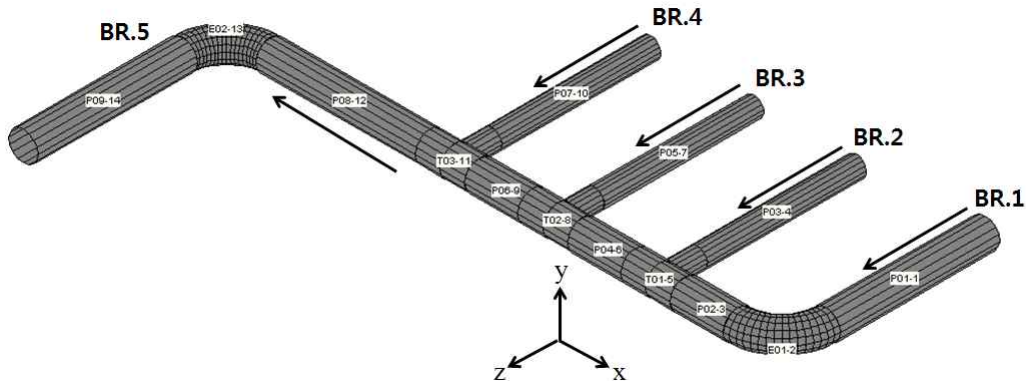


Fig. 4. Analysis model for multi-flow line.

Table 3. Properties by multi-flow line

Items		Values	Units
Source Pressure	Br. 1 ~ 5	2.26	MPa
Sink Pressure	Br. 5	1.89	
Total loss coefficient	Br. 1	1.738	-
	Br. 2	1.5	
	Br. 3	1.5	
	Br. 4	1.5	
	Br. 5	3.526	
Temperature		165.2	°C
Density		903.28	kg/m ³
Dynamic Viscosity		0.164	cP

각각(T01-5, T01-5(Br), T02-8(Br), T03-11(Br))의 압력이 2.23 MPa로 모두 같은 압력값을 갖는 것을 알 수 있다. 그러나 실제로 배관의 형상을 살펴보면 Branch

1과 Branch 2의 출구만 동일한 압력값을 가져야하므로 다른 Branch의 출구압력은 같아서는 안 된다. 또한 Branch 5의 해석결과를 살펴보면 각 Branch(T01-5(Br), T02-8(Br), T03-11(Br))의 출구압력이 Branch 5의 배관(T01-5, T02-8, T03-11) 압력과 동일한 값이어야 하지만 CHECWORKS 프로그램에서는 다르게 계산되고 있는 것을 알 수 있다. 즉, Branch 3의 출구 배관은 T02-8(Br)로 Branch 3의 해석결과 데이터를 보면 압력값이 2.2282 MPa의 출구압력을 갖지만 Branch 5의 해석결과 데이터(T02-8)에서는 동일한 위치에서 압력이 2.0999 MPa로 서로 다른 값을 알 수 있다. 동일한 배관에서 각 Branch 계산에 따라 다른 압력을 계산하는 오류는 다른 배관에서도 동일하게 나타났다. 그러나 공학적 계산결과를 살펴보면 CHECWORKS가 제시하는 값과 다르게 Branch 1과 Branch 2의 출구(T01-5, T01-5(Br), Branch 5의 입구압력) 압력만 같고 다른 Branch의 출구압력은 다른 것을 알 수 있다. 또한 각 Branch의 계산에 의한 배관의 압력과 Branch 5의 계산에 의한 배관의 압력이 동일하게 나타난 것을 알 수 있다. 특히 각 라인을 흐르는 유량이 많은

Table 4. Results of CHECWORKS and engineering calculation

Branch Number	Flow rate(kg/s)			Components	Pressure Values(MPa)		
	CHEC.	Eng'g Calc.	(CHEC.)-(Eng'g Calc.)		CHEC.	Eng'g Calc.	(CHEC.)-(Eng'g Calc.)
Branch 1	98.8825	79.7882	19.0943	Inlet Pressure	2.2600	2.2600	0.0000
				P01-1	2.2480	2.2512	-0.0032
				E01-2	2.2443	2.2488	-0.0045
				P02-3	2.2438	2.2484	-0.0046
				T01-5	2.2282	2.2383	-0.0101
Branch 2	46.2769	37.3949	8.8820	Inlet Pressure	2.2600	2.2600	0.0000
				P03-4	2.2458	2.2498	-0.004
				T01-5(Br)	2.2282	2.2383	-0.0101
Branch 3	46.2769	62.3223	-16.0454	Inlet Pressure	2.2600	2.2600	0.0000
				P05-7	2.2458	2.2366	0.0092
				T02-8(Br)	2.2282	2.2047	0.0235
Branch 4	46.2769	98.5757	-52.2988	Inlet Pressure	2.2600	2.2600	0.0000
				P07-10	2.2458	2.2057	0.0401
				T03-11(Br)	2.2282	2.1259	0.1023
Branch 5	237.7134	278.0811	-40.3677	Inlet Pressure	2.2282	2.2383	-0.0101
				T01-5(D/S)	2.1832	2.2274	-0.0442
				P04-6	2.1805	2.2267	-0.0462
				T02-8	2.0999	2.2047	-0.1048
				T02-8(D/S)	2.0999	2.1790	-0.0791
				P06-9	2.0973	2.1774	-0.0801
				T03-11	2.0167	2.1259	-0.1092
				T03-11(D/S)	2.0167	2.0642	-0.0475
				P08-12	2.0088	2.0532	-0.0444
E02-13	1.9873	2.0237	-0.0364				
P09-14	1.8900	1.8900	0.0000				

차이가 있음을 확인할 수 있는데, 유량은 배관 내를 흐르는 유체의 유속과 직접적인 연관이 있는 변수이기 때문에 이로 인한 감속률의 오차가 예상된다. 따라서 이러한 결과로부터 복잡한 구조의 배관라인에 대해서는 CHECWORKS가 실제와 다른 결과를 제시하는 것으로 확인되었다.

4. 결 론

국내 원전의 FAC에 의한 배관감속은 CHECWORKS 프로그램의 WRA 분석을 통해 감속률을 예측하여 관리되고 있다. WRA의 분석을 위해서는 먼저 NFA 해석이 이루어져야 하는데 여러 개의 배관라인이 복잡하게 설치되어 있는 경우에는 CHECWORKS 프로그램의 NFA 해석에서 잘못된 결과가

도출 되고 있음을 확인하였다. 따라서 CHECWORKS 프로그램의 잘못된 해석결과를 공학적 계산을 통해 분석할 필요가 있다. 이에 따라 먼저 공학적 계산의 신뢰성을 확인하기 위하여 유체의 입구와 출구가 한 개인 단일 배관라인 모델을 대상으로 CHECWORKS의 NFA 해석 결과와 공학적 계산 결과를 비교한 결과, 두 결과가 정확하게 일치하였다. 이로부터 확인된 계산과정을 바탕으로 복잡하게 구성되어 있는 배관라인에 적용해 본 결과, 공학적 계산결과와 NFA 해석 사이에서 다소 차이가 있는 것을 확인하였다.

CHECWORKS 프로그램에는 배관라인의 형태를 9가지 Type으로 분류하여 현장의 배관라인 형태를 가장 비슷한 Type에 적용하여 해석을 수행하도록 구성되어 있다. 그러나 실제 현장의 배관에서는 CHECWORKS 프로그램이 규

정해 놓은 배관 Type과 다른 배관이 있을 수 있다. 이러한 부분에서 CHECWORKS 프로그램이 실제와 다른 값을 계산하고 있는 것으로 추정된다. 실제 수치상으로 두 결과를 비교해보면 압력값이 1 bar 미만의 차이를 보이기 때문에 이 정도의 오차는 무시할 수 있을 수도 있지만 배관 중간에 유체의 유동을 교란시키는 밸브나 오리피스와 같은 컴포넌트가 위치하는 경우 그 차이는 무시할 수 없으며, 이는 WRA 결과에도 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 복잡하게 구성되어 있는 배관을 CHECWORKS 프로그램으로 분석하여 배관을 관리할 경우에는 많은 주의가 요구된다. 향후 본 논문에서 다른 조건에 대한 WRA 결과를 비교하여 NFA 오류로 인한 감육률의 차이를 분석하고, 유동을 교란시키는 컴포넌트에 대한 해석을 수행하여 CHECWORKS 프로그램에 대

한 신뢰성을 향상 시킬 것이다.

참 고 문 헌

1. Y. A. Cengel and J. M. Cimbala, *Fluid Mechanics Fundamentals & Applications*, 1st ed, McGraw-Hill (2005).
2. CHECWORKS, *Steam-Feedwater Application Help System - Network Flow Analysis*, CHECWORKS 3.0 SP-2, USA (2010).
3. B. Chexal and J. Horowitz, *Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants*, Rev. 1, EPRI. (1998).
4. I. E. Idelchik, *Handbook of Hydraulic Resistance* (2005).
5. Crane Co., *Flow of Fluids Through Valve, Fittings, and Pipe*, Crane Technical Paper No. 410, 22th, New York, USA (1985).