

CHECWORKS와 ToSPACE 프로그램의 배관감육 해석결과 비교

황 경 모[†] · 윤 훈 · 서 혁 기

한국전력기술(주) 재료기술그룹, 경상북도 김천시 혁신로 269
(2018년 10월 23일 접수, 2018년 11월 13일 수정, 2018년 11월 14일 채택)

Comparison of Wall Thinning Analysis Results between CHECWORKS and ToSPACE

Kyeongmo Hwang[†], Hun Yun, and Hyeokki Seo

Material Engineering Department, KEPCO-E&C, 269 Hyeoksin-ro, Gimcheon-si, Gyeongbuk, 39660, Korea
(Received October 23, 2018; Revised November 13, 2018; Accepted November 14, 2018)

Assumptions have always been that wall thinning on the secondary side piping in nuclear power plants is mostly caused by Flow-Accelerated Corrosion (FAC). Recent studies have showed that wall thinning on the secondary side piping is caused by Liquid Droplet Impingement Erosion (LDIE), Solid Particle Erosion (SPE), cavitation, and flashing. To manage those aging mechanisms, several software such as CHECWORKS, COMSY, and BRT-CICERO have been used in nuclear power plants. Korean nuclear power plants have been using the CHECWORKS program since 1996 to date. However, many site engineers have experienced a lot of inconveniences and problems in using the CHECWORKS program. In order to work through the inconveniences and to remedy problems, KEPCO-E&C has developed a “3D-based pipe wall thinning management program (ToSPACE)” based on the experience of over 30 years in relation to the pipe wall thinning management. This study compares the results of FAC and LDIE analysis using both the CHECWORKS and ToSPACE programs with respect to validation of the wall thinning analysis results.

Keywords: Pipe wall thinning, Flow-accelerated Corrosion, Liquid droplet impingement erosion, CHECWORKS, ToSPACE

1. 서론

원전 2차측의 배관은 내부에 고온 고압의 유체가 흐르기 때문에 가동년수가 증가함에 따라 배관이 점차 얇아지는 감육 (Wall-thinning) 현상을 경험하게 된다. 배관의 감육을 유발시키는 메커니즘으로는 유동가속부식 (FAC, flow-accelerated corrosion), 액적충돌침식 (LDIE, liquid droplet impingement erosion), 캐비테이션 (Cavitation), 플래싱 (Flashing), 고체입자침식 (SPE, solid particle erosion) 등이 있다. 이러한 감육 손상으로 인하여 배관이 누설, 파단 되어 경제적 손실뿐만 아니라, 인명 손실을 경험한 바 있다. 그 대표적인 예가 1986년에 발생한 미국의 Surry 2호기 배관파단 사고 [1]와 2004년 일본의 Mihama

3호기에서 발생한 배관파단 사고 [2]이다. 한국의 원전에서도 지속적으로 배관감육 손상이 발생하고 있으며, 가동년수 증가에 따라 배관감육 손상은 점차 증가할 것으로 예상된다. 이러한 배관감육 손상을 관리하기 위하여 미국에서는 CHECWORKS, 프랑스에서는 BRT-CICERO, 독일에서는 COMSY 프로그램을 개발하여 운영하고 있다. 한국은 과거 30여년 동안 고유의 프로그램이 없어 미국의 CHECWORKS 프로그램으로 배관감육을 관리하여 왔으나 현장 운영 측면에서 다소 많은 불편함을 겪어왔다. 이에 따라 과거 30여년간 한국에 축적된 배관감육관리의 경험을 바탕으로 하고, 현장 배관감육관리 담당자의 편의 측면에서 기능을 개선한 신규 배관감육관리 프로그램 즉, ToSPACE (total solution for piping and component engineering management) 프로그램을 개발하였다. 본 논문에서는 감육해석 결과의 유효성 분석 측면에서 ToSPACE와 CHECWORKS 프로그램을 이용

[†] Corresponding author: hkm@kepc0-enc.com

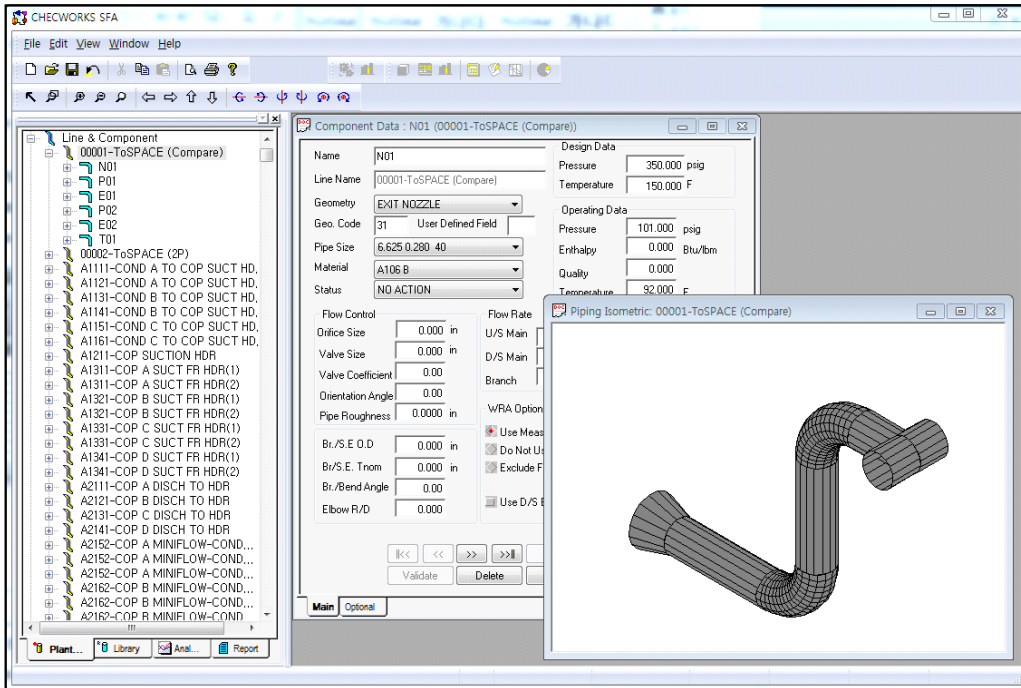


Fig. 1 DB construction and 3D display using CHECWORKS program.

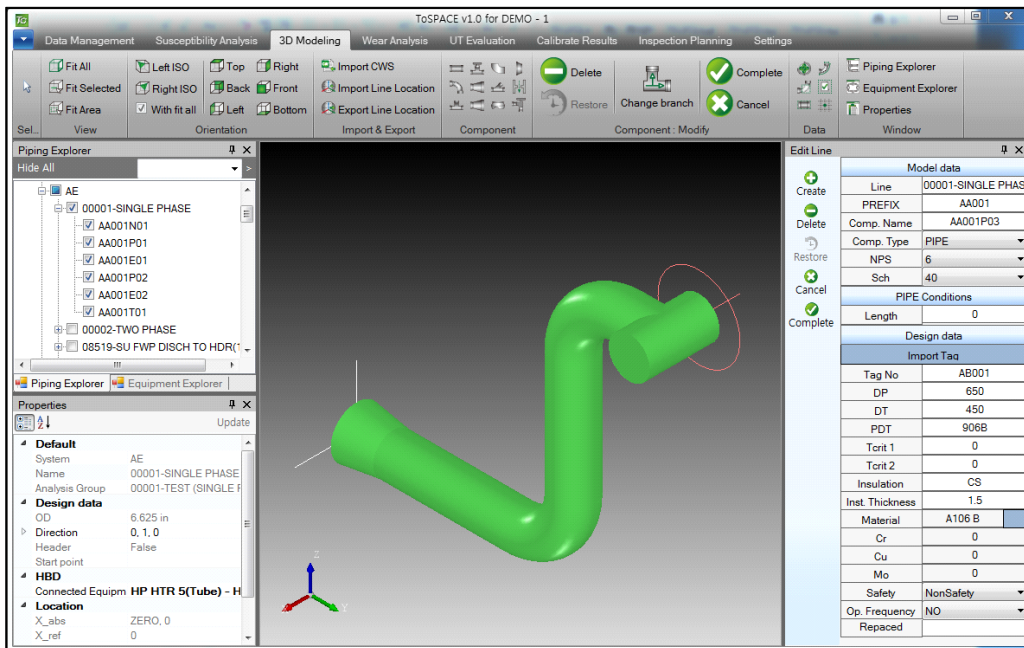


Fig. 2 DB construction and 3D display using ToSPACE program.

한 유동가속부식 및 액적충돌침식 해석 결과를 비교 분석한 내용을 소개한다.

2. 해석모델 구성

2.1 해석 DB 구축

ToSPACE 프로그램과 CHECWORKS 프로그램의 해석 결과를 비교하기 위하여 두 프로그램으로 동일하게 간단한 배관라인 모델을 구성하였다. 모델의 컴포넌트 순서는 출구 노즐 (N01), 직관 (P01), 엘보우 (E01), 직관 (P02), 엘보우 (E02), 티 (T01)이다. Fig. 1과 Fig. 2는 CHECWORKS 프로그램과 ToSPACE 프로그램의 DB 구축 창과 3D로 구성

Table 1 Boundary conditions for FAC and LDIE analyses

Phase	Units	Single-phase	Two-phase
Flow Rate	Mlb/hr	0.49	0.49
Inlet Pressure	psig	-	325.59
Inlet Enthalpy	Btu/lb	60	850
Outlet Pressure	psig	100	100

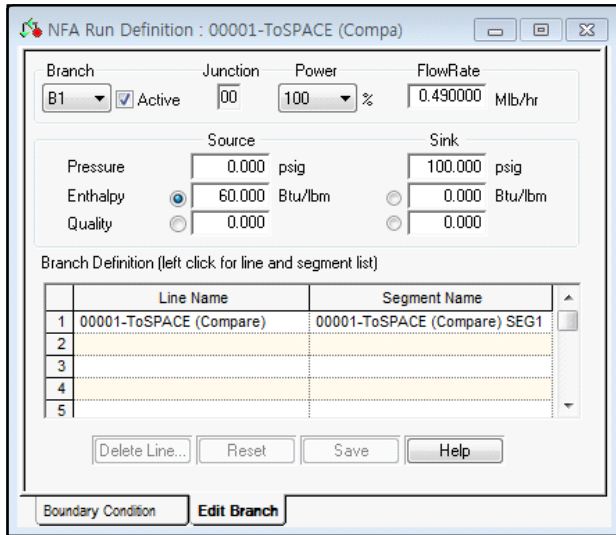


Fig. 3 NFA Boundary Condition.

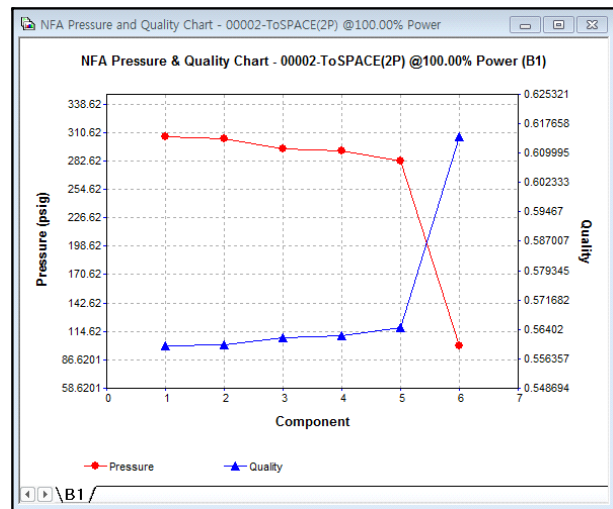


Fig. 4 NFA Evaluation Result.

된 배관라인을 보여준다. 본 모델은 단상 및 2상 유동가속부식 해석과 액적충돌침식에 동일하게 적용된다. CHECWORKS 프로그램은 배관라인의 유체 흐름방향 순으로 컴포넌트 DB를 작성한 후 Connectivity 기능에서 배관순서를 결정하면

그림에서 볼 수 있는 3차원 형태의 배관이 구성된다. 반면 ToSPACE 프로그램은 배관라인을 구성하고 있는 컴포넌트를 하나씩 붙여 나가면 3D가 작성되고 라이브러리 형식으로 저장된 배관 라인목록 (Line List)의 데이터를 불러와서 DB가 자동으로 구축되는 방식이다.

2.2 해석 경계조건

단상 및 2상 유체 배관의 유동가속부식 해석을 위한 경계조건은 Table 1에서 볼 수 있으며, 해석결과 비교를 위하여 ToSPACE 프로그램과 CHECWORKS 프로그램에 동일한 경계조건을 적용하였다. 액적충돌침식은 2상 유체 조건에서만 발생 가능하므로 2상 유체 배관의 경계조건을 액적충돌침식 평가에도 동일하게 적용하였다. 유체의 pH 역시 두 프로그램에 모두 6.6으로 설정하였다.

3. 해석수행 및 결과 분석

3.1 해석수행

CHECWORKS 프로그램에서 유동가속부식과 액적충돌침식을 해석하기 위해서는 열수력해석(NFA, network flow analysis)을 우선적으로 수행해야 한다. 열수력해석을 위해서는 입력할 데이터 존재 유무에 따른 해석조건을 결정하고, Table 1에 제시된 경계조건을 입출구 배관에 입력하여 해석을 수행하면 라인을 구성하고 있는 배관 컴포넌트별로 온도, 압력, 엔탈피, 건도, 유속 등이 계산된다 [3]. Fig. 3은 열수력해석 경계조건을 입력하는 창이고 Fig. 4는 해석결과와 그래프를 예로서 제시한 것이다. 열수력해석 결과를 이용하여 유동가속부식 해석을 수행하기 위해서는 NFA 결과를 이용한다는 것을 프로그램에 인식시키고, 액적충돌침식 해석을 위해서는 밸브 개도를 입력하고 해석을 수행하면 된다. 유동가속부식과 액적충돌침식 해석 결과는 Report 형식으로 제시된다.

ToSPACE 프로그램에서는 열유동해석과 유동가속부식과 액적충돌침식 해석이 동시에 진행된다. 물론 고체입자침식, 캐비테이션 등과 같은 다른 손상기구를 해석하고자 할 때도 한 번에 해석이 완료된다. Fig. 5는 해석을 위한 입력창을 보여준다. 3D 상에서 입구 및 출구의 경계조건을 입력한 후 완료 버튼을 클릭하면 해석이 수행되고, 해석결과는 그림에서 보는 바와 같이 감옥물에 따라 컬러로 표기된다. 액적충돌침식은 열유동해석 (THA, thermal hydraulic analysis)의 결과로 나타나는 유체의 상과 건도를 프로그램 내에서 자동으로 반영하여 유동가속부식과 동시에 해석이 수행된다.

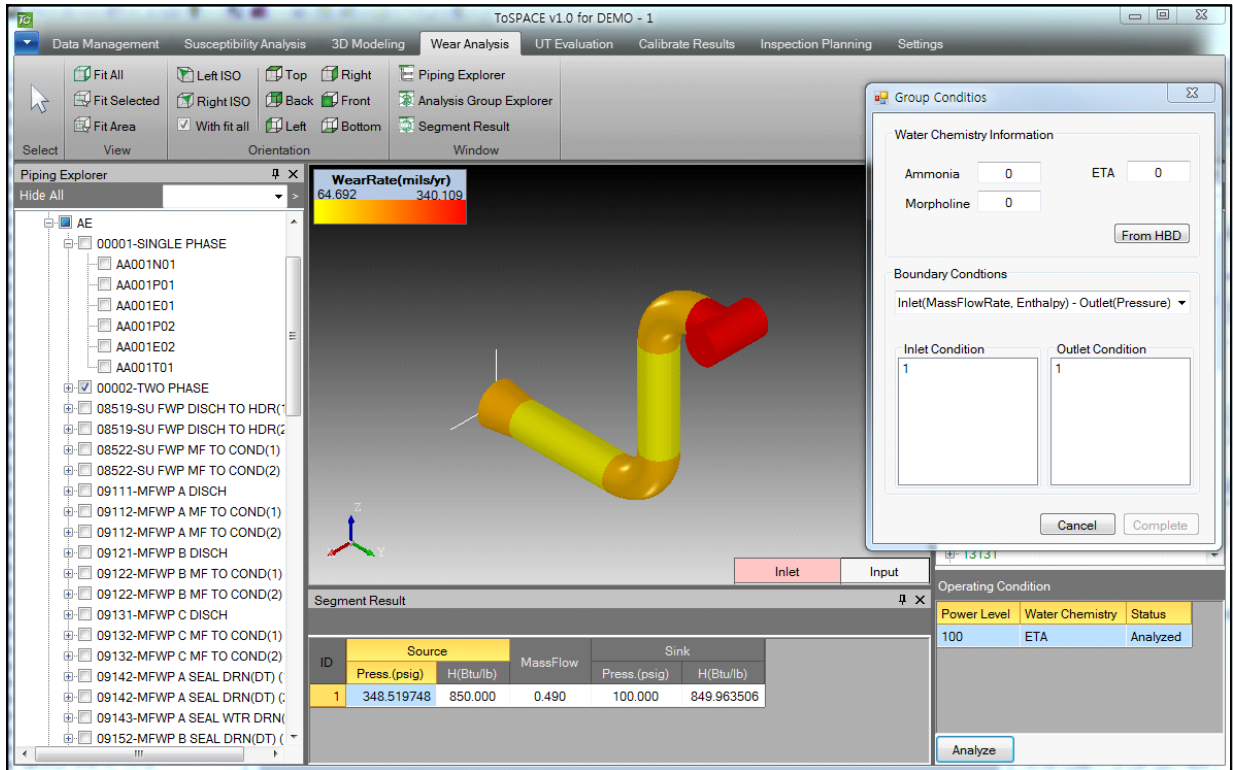


Fig. 5 Window for inputting Boundary Condition of ToSPACE.

Table 2 Comparison of single-phase analysis results between CHECWORKS and ToSPACE

Component	Pressure, psig		Enthalpy, Btu/lb		Velocity, ft/sec			Wear Rate, mils/yr	
	CHEC	ToSPACE	CHEC	ToSPACE	CHEC (NFA)	CHEC (WRA)	ToSPACE	CHEC	ToSPACE
N01	102.700	102.598	60.000	60.000	10.929	12.100	10.927	5.613	2.724
P01	101.940	102.559	60.000	60.001	10.929	12.100	10.927	2.372	1.239
E01	101.750	102.058	60.000	60.001	10.929	12.100	10.927	3.416	2.430
P02	100.990	101.300	60.000	60.003	10.929	12.100	10.927	2.372	1.141
E02	100.800	100.800	60.000	60.003	10.929	12.100	10.927	3.416	2.397
T01	100.000	100.000	60.000	60.003	10.929	12.100	10.927	3.730	3.724

3.2 해석결과 분석

3.2.1 단상유체의 유동가속부식 해석결과 비교

Table 2는 앞에서 언급한 단상 유체의 경계조건을 이용하여 CHECWORKS와 ToSPACE 프로그램으로 해석한 결과를 비교한 것이다. Table 2에서 CHEC는 CHECWORKS 프로그램을 의미한다. Fig 6부터 Fig. 9까지는 육안으로 확인하기 쉽도록 압력, 엔탈피, 유속 및 감속률을 그래프로 나타낸 것이다. 단상 유체의 경우 압력과 엔탈피는 두 프로그램에서 거의 동일하게 계산된 것을 알 수 있다. 유속의 경우에는 CHECWORKS 프로그램 내에서 해석되는 NFA

결과와 WRA (wear rate analysis) 결과가 다른 것을 알 수 있다. 오히려 CHECWORKS의 NFA 결과로 나타나는 유속과 ToSPACE로 계산된 유속이 비슷한 것을 알 수 있다. 동일한 프로그램에서 별도의 유속이 계산된다는 것은 논리적으로 타당하지 않은 것으로 판단된다. 기본적으로 CHECWORKS 프로그램 내에서 WRA 계산에 반영되는 유속은 NFA의 결과로 계산되는 유속이지만 이해하기 어려운 유속을 계산에 활용하고 있는 것을 알 수 있다. Table 2와 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 감속률은 CHECWORKS와 ToSPACE에서 경향은 비슷하게 계산된 것을 알 수 있다. 그러나

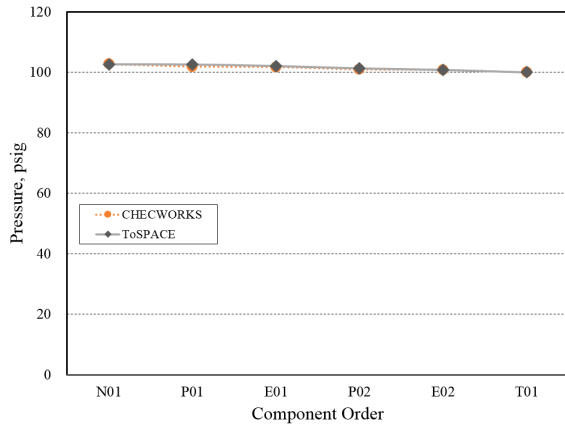


Fig. 6 Comparison of Pressure in Single-Phase Fluid.

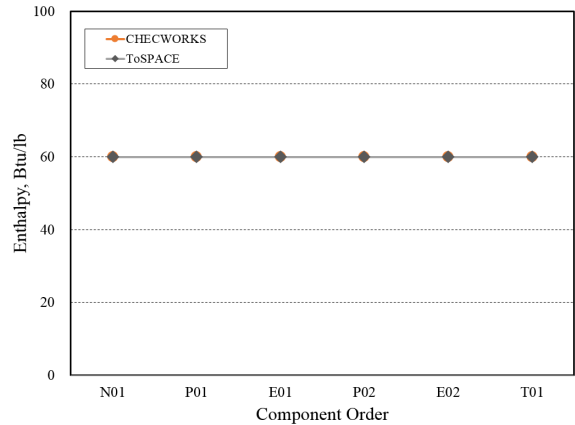


Fig. 7 Comparison of Enthalpy in Single-Phase Fluid.

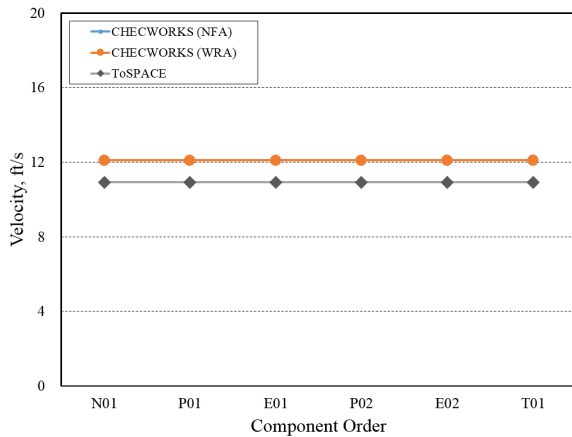


Fig. 8 Comparison of Velocity in Single-Phase Fluid.

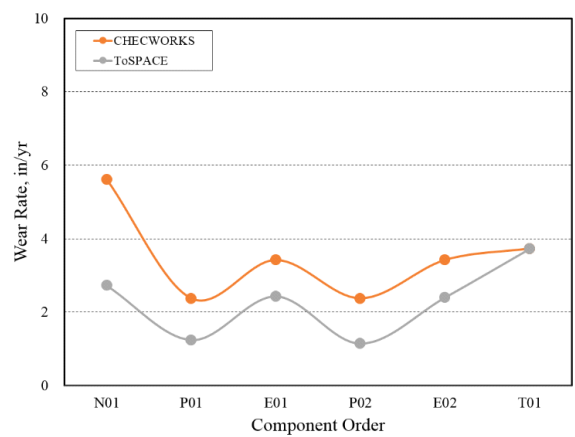


Fig. 9 Comparison of Wear Rate in Single-Phase Fluid.

CHECWORKS에서는 NFA 결과로 나타나는 유속이 아닌 다른 유속을 활용하고 있으며, 두 개의 엘보우 (E1, E2) 에서 감속률이 동일하게 계산 (3.416 mils/yr) 되고 있다는 측면에서 난류 증폭의 영향도 반영하지 못하고 있는 것을 알 수 있다.

3.2.2 2상유체의 유동가속부식 해석결과 비교

Table 3은 앞에서 언급한 2상 유체의 경계조건을 이용하

여 CHECWORKS와 ToSPACE 프로그램으로 해석한 결과를 비교한 것이다. Table 3에서 ToS는 ToSPACE 프로그램을 의미한다. Table 3과 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 CHECWORKS 프로그램의 NFA와 ToSPACE로 해석된 건도가 비슷한 반면, CHECWORKS 프로그램의 WRA 해석 결과로 나타난 건도가 다른 것을 알 수 있다. 이러한 사실 역시 동일한 프로그램에서 별도의 건도가 계산된다는 것은 논리적으로 타당하지 않은 것으로 판단된다. Fig. 11에서

Table 3 Comparison of two-phase analysis results between CHECWORKS and ToSPACE

Component	Quality			Pressure, psig		Enthalpy, Btu/lb		Velocity, ft/sec			Wear Rate, mils/yr	
	CHEC (NFA)	CHEC (WRA)	ToS	CHEC	ToS	CHEC	ToS	CHEC (NFA)	CHEC (WRA)	ToS	CHEC	ToS
N01	0.560	0.321	0.556	306.900	325.610	658.100	850.000	199.172	136.230	519.788	90.163	149.218
P01	0.560	0.315	0.556	304.880	323.094	653.500	849.982	203.965	135.217	524.128	24.869	68.231
E01	0.562	0.317	0.558	294.980	311.652	653.000	849.982	206.941	120.076	544.285	36.202	137.021
P02	0.562	0.315	0.559	292.820	308.977	650.400	849.964	209.988	138.417	548.994	25.721	64.692
E02	0.564	0.317	0.561	282.150	296.588	649.800	849.964	213.426	123.549	572.856	41.878	139.612
T01	0.614	0.384	0.614	100.000	100.000	647.000	849.964	216.302	278.237	814.473	126.571	340.109

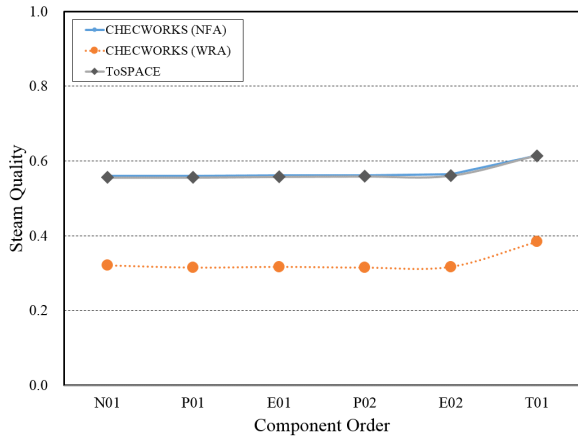


Fig. 10 Comparison of Steam Quality in Two-Phase Fluid.

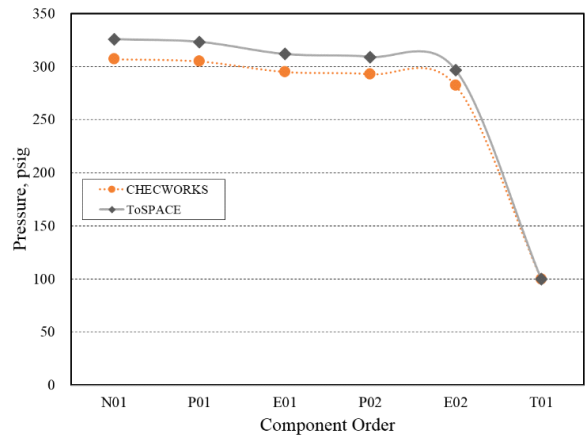


Fig. 11 Comparison of Pressure in Two-Phase Fluid.

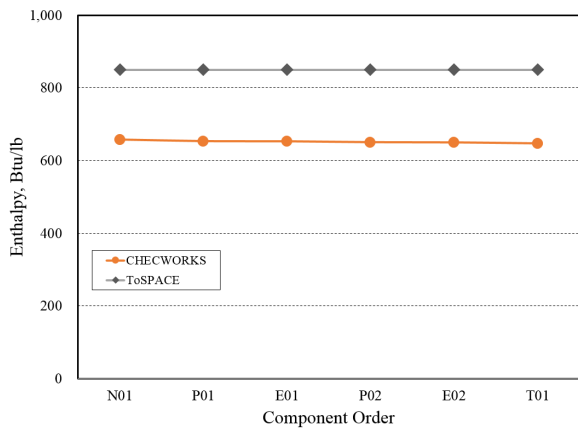


Fig. 12 Comparison of Enthalpy in Two-Phase Fluid.

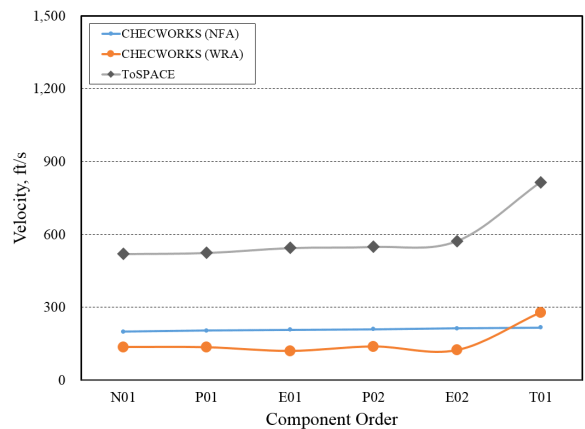


Fig. 13 Comparison of Velocity in Two-Phase Fluid.

압력분포는 두 프로그램에서 비슷한 경향을 보이고 있다. Fig. 12에서 엔탈피는 두 프로그램의 값이 많이 다른 것을 알 수 있다. 그러나 Table 1에서 제시한 입력 경계조건에서 볼 수 있듯이 입구 엔탈피는 850 Btu/lb로 입력하였으나 CHECWORKS 프로그램에서는 입구노즐부터 658.1 Btu/lb로 계산되는 것을 알 수 있다. 이는 CHECWORKS 프로그램의 명백한 오류로 판단된다. Fig. 13은 유속을 비교한 것으로서 CHECWORKS 프로그램 내의 NFA 및 WRA 결과로 계산되는 유속이 다른 것을 알 수 있으며, ToSPACE 프로그램으로 계산된 유속이 CHECWORKS에 비해 빠른 것을 알 수 있다. 이는 CHECWORKS 프로그램에서 낮은 엔탈피로 변경하여 계산하였기 때문이다. Fig. 14는 감속률을 비교한 것으로서 컴포넌트별 상대적인 감속경향은 두 프로그램이 비슷하지만 CHECWORKS 프로그램으로 계산한 감속률이 ToSPACE 보다 작은 것을 알 수 있다. 이러한 사실 역시 CHECWORKS 프로그램에서 낮은 엔탈피로 변경하여 계산하였고, 그에 따른 낮은 유속이 감속률 계산에 반영되었기 때문이다.

3.2.3 2상유체의 액적충돌침식 해석결과 비교

Fig. 15는 CHECWORKS 프로그램과 ToSPACE 프로그램에서 계산된 2상 유체의 액적충돌침식률(LDIE Rate)을 비교한 그래프이다. CHECWORKS 프로그램에서 LDIE는 Heymann 이론식 [4]을 적용하고 있고 ToSPACE 프로그램에서는 한국전력기술(주)에서 개발한 K-S 이론식 [5,6]을 적용하고 있다. Heymann 이론식은 equation (1)과 같으며, K-S 이론식은 equation (2)와 같다. equation (1)에서 볼 수 있듯이 Heymann 이론식은 단지 액적의 속도만을 고려하고 있는 반면 K-S 이론식은 배관 내부의 유동 가속부식과 액적충돌침식의 복합손상을 고려하고 있으며, 충돌하는 액적의 개수를 침식 계산에 반영하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 15에서 볼 수 있듯이 액적충돌침식은 두 프로그램에서 모두 액적이 배관 벽면에 수직으로 충돌하는 티에서 가장 크게 계산되었으며, ToSPACE 프로그램에서는 그 다음으로 90도 엘보우가 큰 것으로 계산한 반면 CHECWORKS 프로그램에서는 다음 순위를 판별하기 어렵다. 90도 엘보우에서도 액적의 충돌각으로 인하여 액적충돌침식에 영향을 받는 것으로 고려할 때 ToSPACE의 판별 성능이 더

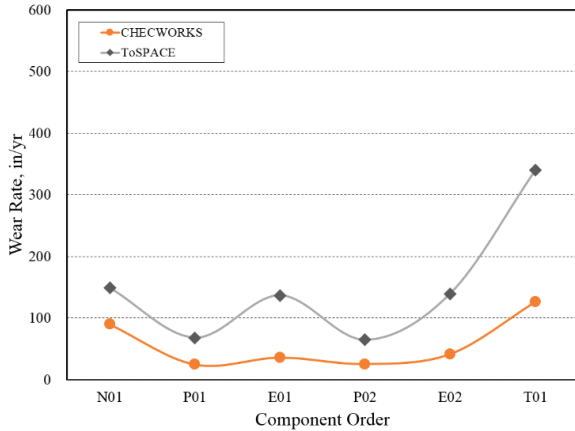


Fig. 14 Comparison of Wear Rate in Two-Phase Fluid.

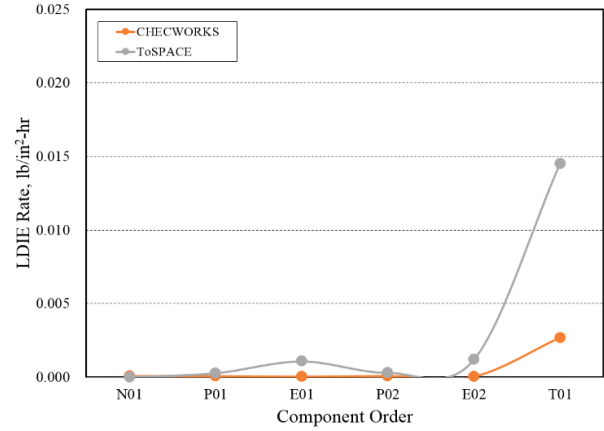


Fig. 15 Comparison of LDIE Rate in Two-Phase Fluid.

나은 것으로 판단된다.

$$\dot{m}_{LDIE} = (1.0625 \times 10^{-19}) \cdot v_d^{5.047} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{LDIE} = C_1 \cdot m_d \cdot v_d^2 \cdot N_d \cdot f(H_v) \cdot f(\theta) + \dot{m}_I \quad (2)$$

$$\dot{m}_I = C_0 \cdot (m_d \cdot v_d^2)^\alpha \cdot N_d \cdot S_m \cdot f(AC) \quad (3)$$

여기서, \dot{m}_{LDIE} : LDIE Rate, lb/in²-hr (g/cm²-hr)

\dot{m}_I : Loss Rate at Initiation Stage,
lb/in²-hr (g/cm²-hr)

$C_0 = 1.15 \times 10^{-11}$, $C_1 = 1.0 \times 10^{-12}$

α : Constant (0.2)

m_d : Mass of a droplet, g

V_d : Velocity of droplets, m/s

N_d : Number of droplets

S_m : Solubility of magnetite, g/m³

$f(T)$: Temperature correction factor

$f(AC)$: Alloy content correction factor

$f(H_v)$: Vickers hardness correction factor

$f(\theta)$: Collision angle correction factor

4. 결론

한국전력기술(주)에서는 지난 30여년 간 누적된 배관감육

관리 경험과 노하우를 바탕으로 3D 기반 선진 배관감육관리 프로그램 (ToSPACE)을 개발하였다. ToSPACE 프로그램은 기존 국내 원전에 적용하던 프로그램에서 나타난 각종 문제점을 개선하고 현장 배관감육관리 담당자의 편의 측면에서 기능을 개선한 프로그램이다. 본 논문에서는 감육해석 결과의 유효성 분석 측면에서 ToSPACE와 CHECWORKS 프로그램을 이용한 유동가속부식 및 액적충돌침식 해석 결과를 비교 분석한 내용을 소개하였다. 비교 결과 두 프로그램의 감육해석 경향은 비슷하였으나, CHECWORKS 프로그램에서는 공학적으로 논리가 맞지 않는 부분이 있는 것을 확인하였다. 즉, 유속과 같이 동일한 프로그램에서 두 개의 다른 값을 계산한다는 것과 엔탈피와 같이 입력 경계조건과 다른 값을 해석에 반영하고 있다는 사실이 본 연구를 통하여 확인되었다.

References

1. NRC Bulletin 87-01, Thinning of Pipe Walls in Nuclear Power Plants (1987).
2. NISA/METI Press Release, Automatic Shutdown of Unit 3 - 4th Report, Maeda and Amano (2004).
3. EPRI, Recommendations for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program(NSAC-202L-R4), EPRI Report 3002000563, Palo Alto, CA (2013).
4. F. J. Heymann, *J. Appl. Phys.*, **40**, 5113 (1969).
5. K. M. Hwang, H. K. Seo, C. K. Lee, and W. C. Nam, *World J. Nucl. Sci. Tech.*, **7**, 1 (2017).
6. K. M. Hwang and D. Y. Lee, *Corros. Sci. Tech.*, **11**, 218 (2012).