

## ToSPACE 프로그램을 이용한 FAC 해석결과와 실험결과 비교

황 경 모<sup>1,†</sup> · 윤 훈<sup>1</sup> · 서 혁 기<sup>1</sup> · 정 의 제<sup>1</sup> · 김 경 모<sup>2</sup> · 김 동 진<sup>2</sup>

<sup>1</sup>KEPCO E&C, 경상북도 김천시 혁신로 269

<sup>2</sup>KAERI, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

(2020년 4월 8일 접수, 2020년 5월 21일 수정, 2020년 5월 22일 채택)

## Comparison Between FAC Analysis Result Using ToSPACE Program and Experimental Result

Kyeongmo Hwang<sup>1,†</sup>, Hun Yun<sup>1</sup>, Hyukki Seo<sup>1</sup>, Euije Jung<sup>1</sup>, Kyungmo Kim<sup>2</sup>, and Dongjin Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>KEPCO E&C, 269 Hyeoksin-ro, Gimcheon-si, Gyeongsangbuk-do, Korea

<sup>2</sup>KAERI, 111 Daedeok-daero, 989 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon-si, Korea

(Received April 08, 2020; Revised May 21, 2020; Accepted May 22, 2020)

A number of piping components in the secondary system of nuclear power plants (NPPs) are exposed to aging mechanisms, such as flow-accelerated corrosion (FAC), cavitation, flashing, solid particle erosion, and liquid droplet impingement erosion. Those mechanisms may lead to thinning, leaking, or rupture of the components. Due to the pipe ruptures caused by wall thinning in Surry unit 2 in the USA in 1986 and Mihama unit 3 in Japan in 1994, pipe wall thinning management has emerged as one of the most important issues in the nuclear industry. To manage pipe wall thinning, a foreign program has been utilized for NPPs in Korea since 1996. As our experience and knowledge of pipe wall thinning management have accumulated, our program needs to reflect our experience, requests from users, and the result of recent experiments using Flow Accelerated Corrosion Testing System (FACTS). FACTS is the empirical experimental facility developed by Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) for tests. Accordingly, KEPCO-E&C developed a 3D-based pipe wall thinning management program called ToSPACE in 2016. This paper describes a comparison between the FAC analysis results using ToSPACE and the experimental results using FACTS to verify their applicability to pipe wall thinning management in NPPs.

**Keywords:** ToSPACE, FACTS, Pipe Wall Thinning, Flow-Accelerated Corrosion (FAC), FAC Experiment

### 1. 서론

원전 2차측의 배관은 내부에 고온 고압의 물과 증기가 흐르기 때문에 가동년수가 증가함에 따라 배관이 점차 얇아지는 감육(Wall Thinning) 현상을 경험하게 된다. 원전에서 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 [1]. 이러한 감육 손상으로 인하여 배관이 누설, 파단될 경우 경제적 손실뿐만 아니라, 인명 손실을 경험하게 된다. 그 대표적인 예가 1986년에 발생한 미국의 Surry 2호기 배관파단사고 [2]와 2004년 일본의 Mihama 3호기에서 발생한 배관파단사고 [3]이다. 한국의 원전에서도 지속적으로 배관감육 손상이 발생하고 있으며, 가동년수 증가에 따라 배관감육 손상은 점차 증가할 것으로 예상된다. 배관감육 손상을 관리하기 위하여 미국에서는 CHECWORKS, 프랑스에서는 BRT-CICERO, 독일에서는 COMSY 프로그램을 개발하여 운영하고 있다. 한국은 과거 30여년 동안 미국의 CHECWORKS 프로그램으로 배관감육을 관리하여 왔으나, 그간 한국에 축적된 배관감육 관리의 경험을 바탕으로 현장 배관감육관리 담당자의 편의

<sup>†</sup>Corresponding author: hkm@kepc0-enc.com

황경모: 부장, 윤훈: 차장, 서혁기: 과장, 정의제: 사원, 김경모: 책임연구원, 김동진: 책임연구원

측면에서 기능을 개선한 신규 배관감육관리프로그램, 즉 ToSPACE (Total Solution for Piping And Component Engineering management)를 개발하였다. ToSPACE는 위에서 언급한 감육유발 메커니즘 모두를 한 번에 평가할 수 있는 기능을 포함하고 있다. 이외에 현장의 배관감육 관리 업무에 활용하게 될 민감도 분석, 3D DB 구축, 검사 데이터 신뢰도 분석, UT 검사 데이터 평가, 예측 보정, 중장기 검사 계획 수립 등의 기능을 포함하고 있다 [4].

본 논문에서는 원전 2차계통 배관에서 발생하는 대표적인 손상 메커니즘인 유동가속부식을 ToSPACE로 예측한 결과와 실험으로 검증한 결과를 비교하였다. FAC 예측결과 비교에 활용한 실험설비는 한국원자력연구원(KAERI)에서 개발한 유속가속부식 실증시험설비(Flow Accelerated Corrosion Testing System, FACTS)를 활용하였다.

## 2. 실험방법 및 수행

### 가. 실험모델 구성

원자력발전소의 2차계통은 전력생산을 위한 폐루프로 구성되어 있다. 2차계통에서 물과 증기의 수송을 담당하는 탄소강 배관 내부로는 고온, 고속의 유체가 흐르기 때문에 장기간 사용할 경우에는 배관의 두께가 점차 얇아질 수 있다. 한전기술(주)에서는 배관감육 현상을 예측하기 위하여 ToSPACE 프로그램을 개발하였으며, 이를 검증하고자 한국원자력연구원에서 보유하고 있는 FACTS로 실험한 결과와 비교하였다. 동 설비는 유동가속부식 현상을 실증, 모사할 수 있는 시험설비로서 고온, 고압의 유체를 고속으로 순환시키는 루프로 시험배관을 연결하여 배관의 두께변화를 관찰할 수 있다 [5]. 또한 취출수 라인에 정화계통인 이온교환수지를 설치하고 주입수 라인에 수화학 제어계통을 구성하여 시험유체의 용존산소농도와 전도도, pH 등 수화학 조건을 조절할 수 있다.

Fig. 1은 FACTS 실험설비 전체 형상을 보여주고, Fig. 2는 배관의 두께변화를 관찰할 부분만을 촬영한 사진이다. Fig. 3은 설치 설계도로서 고속순환배관(음영처리된 부분)은 부식이 일어나지 않도록 스테인리스강(A312 TP304)으로 제작된 4인치 배관이며, 감육 시험 대상인 흰색 배관은 원전 2차측의 배관 재질로 많이 사용되는 탄소강(A106 B)이다. 탄소강 부분의 배관은 2인치(50.8 mm) 스케줄 80이고, 두 개의 오리피스와 두 개의 엘보우가 설치되어 있다. 오리피스 내경은 40 mm이며 배관직경에 대한 비율( $\beta$ )은 0.8이다. 또한 엘보우는 곡률 반경이 76 mm인 탄소강 재질을 사용하였다. Table 1은 실험결과와 ToSPACE 해석결과를 비교하기 위하여 구성한 데이터베이스이다. Component Name에서 앞에서 세 번째 알파벳은 배관 컴포넌트의 유형을 나타낸다. 즉, P는 직관, E는 엘보우, R은 리듀서, V는 밸브, O는 오리피스, X는 익스팬더를 나타내고 마지막 두 자리 숫자는 설치된 순서를 나타낸다.



Fig. 1 Flow Accelerated Corrosion Testing System (FACTS).



Fig. 2 Photograph of experimental parts.

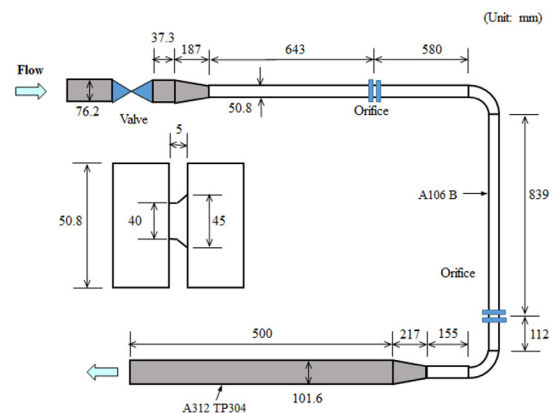


Fig. 3 Design of experimental parts.

**Table 1 Database of experimental model**

| No. | Component Name | Material   | OD, mm     | Thickness, mm | ID, mm       | Length, mm | Insulation Type | Insulation Thick, mm |
|-----|----------------|------------|------------|---------------|--------------|------------|-----------------|----------------------|
| 1   | W-P01          | A312 TP304 | 88.9       | 5.49          | 77.93        | 500        | Cal. Sil        | 55                   |
| 2   | W-V01          | A312 TP304 | 88.9       | 5.49          | 77.93        | 500        | Cal. Sil        | 55                   |
| 3   | W-R01          | A312 TP304 | 88.9×60.3  | 5.49×5.54     | 77.93×49.25  | 187        | Cal. Sil        | 55                   |
| 4   | W-P02          | A106       | 60.3       | 5.54          | 49.25        | 643        | -               | -                    |
| 5   | W-O01          | A106       | 60.3       | -             | 40           | 5          | -               | -                    |
| 6   | W-P03          | A106       | 60.3       | 5.54          | 49.25        | 580        | -               | -                    |
| 7   | W-E01          | A106       | 60.3       | 5.54          | 49.25        | -          | -               | -                    |
| 8   | W-P04          | A106       | 60.3       | 5.54          | 49.25        | 839        | -               | -                    |
| 9   | W-O02          | A106       | 60.3       | -             | 40           | 5          | -               | -                    |
| 10  | W-P05          | A106       | 60.3       | 5.54          | 49.25        | 218        | -               | -                    |
| 11  | W-E02          | A106       | 60.3       | 5.54          | 49.25        | -          | -               | -                    |
| 12  | W-P06          | A106       | 60.3       | 5.54          | 49.25        | 155        | -               | -                    |
| 13  | W-X01          | A312 TP304 | 60.3×114.3 | 5.54×6.02     | 49.25×102.26 | 217        | Cal. Sil        | 55                   |
| 14  | W-P07          | A312 TP304 | 114.3      | 6.02          | 102.26       | 500        | Cal. Sil        | 55                   |

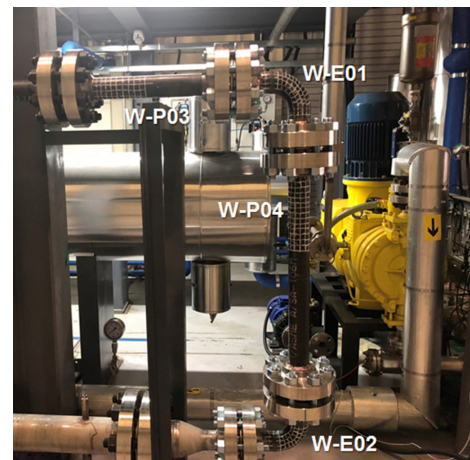
**나. 실험수행**

배관감육 실증시험을 위한 FACTS 설비의 주순환 루프에 탄소강 배관을 연결하여 시험을 수행하였다. 스테인리스강으로 제작된 88.9 mm 주순환 루프에서 배출되는 고온의 취출수는 열교환기를 거쳐 상온으로 냉각되며, 이온교환수지와 질소 탈기장치를 이용하여 용존산소(Dissolved Oxygen, DO)와 전도도(Conductivity), pH 등 수화학 농도를 조절한 후 재순환된다. 실제 원전 2차측의 수화학 환경과 동등한 조건을 모사하기 위하여 시험 중 DO는 5 ppb 이하, 전도도는 약 1  $\mu$ S/cm 이하, pH는 약 8 내외로 유지하였다. 배관 두께 변화는 시험 시작 전과 시험 후에 초음파 탐상검사(Ultrasonic Testing, UT)로 측정하여 시험기간 동안의 두께 변화를 관찰하였다. UT 측정을 위해 격자(Grid)를 그리고 동일 위치의 배관 두께를 측정하여 그 차이를 비교하였다. ToSPACE 검증 실험을 위한 조건은 온도 130 °C, pH 8.2, 압력 8 bar, 유속 3 m/s이고, 1,220시간 동안 시험을 수행하였다.

**Table 2 Average, min, and max wall thinning rates measured by UT (unit: mm/y)**

| Component No. | W-P03 | W-E01 | W-P04 | W-E02 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|
| Average       | 0.27  | 0.43  | 0.38  | 1.19  |
| Minimum       | 0.10  | 0.20  | 0.18  | 0.80  |
| Maximum       | 0.70  | 0.65  | 0.55  | 1.50  |

상온 UT는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 4개 컴포넌트에 미리 격자를 표시하여 감육시험 전과 후에 측정하였다. W-P03은 첫 번째 오리피스 후단의 직관(검사 포인트 수 170개)이고, W-E01은 첫 번째 엘보우(검사 포인트 수 100개), W-P04는 첫 번째 엘보우와 두 번째 오리피스 사이의 수직배관(검사 포인트 수 150개), W-E02는 두 번째 엘보우(검사 포인트 수 100개)이다. 각 구역별로 측정된 상온 UT의 평균, 최소 및 최대값은 Table 2와 같다. 4개 컴포넌트 중 평균 감육률이 가장 큰 부위는 W-E02로서 오리피스와 엘보우 자체에서 발생한 난류의 영향을 가장 크게 받은 것으로 판단되며, 그 다음은 W-E01로서



**Fig. 4 UT Measurement regions.**

W-E02 보다 전단 오리피스까지의 거리가 멀었기 때문에 판단된다. 가장 작은 W-P03 컴포넌트는 오리피스 직후단 배관이지만 오리피스에서 발생한 난류의 영향은 직후단 배관 보다 후단의 엘보우에서 더 많이 영향을 받은 것으로 추정된다.

### 3. 해석방법 및 해석

#### 가. 해석모델 구성

ToSPACE 프로그램의 FAC 예측기능을 검증하기 위하여 실험대상 부위와 동일하게 Table 1을 활용하여 해석모델을 구성하였다. ToSPACE를 이용하여 FAC를 예측하기 위해서는 실제 설치되어 있는 배관의 형태를 3D DB로 구성해야 한다. 이는 설치된 배관의 실제 길이, 구경, 재질, 컴포넌트 유형 등을 유체유동 계산에 반영하기 위함이다. ToSPACE에서 3D를 구성하기 위해서는 DB 구축을 시작하는 단계에서 배관 직경, 두께, 재질, 설계압력, 설계온도, 보온재 정보를 입력한 후 배관을 3차원으로 연결해 나가지만 하면 DB가 자동으로 구축되는 방식이다. 이러한 방식은 사용자가 배관 배치형태를 육안으로 확인하면서 만들어 나가기 때문에 인적 오류를 최소 수준으로 낮출 수 있다 [6]. Fig. 5는 실험대상 부위와 동일하게 구성한 ToSPACE의 3D 모델이다. 그림에서 좌측 상단은 배관 컴포넌트의 명칭을 보여주고, 좌측 하단은 배관 컴포넌트를 클릭할 때 나타나는 배관속성을 보여준다. 우측의 창은 3D를 구성할 때 활용되는 설계정보 라이브러리를 제공한다.

#### 나. 해석수행

ToSPACE를 이용한 감속해석은 3D에서 나타나는 배관 입출구에서 압력, 온도, 엔탈피, 수화학 데이터를 필요에 따라 경계조건으로 입력하면 된다. 여기서 감속해석이란 배관 두께를 얇게 손상시키는 메커니즘 즉, 유동가속부식, 액적충돌침식, 고체입자침식, 캐비테이션 등을 포괄하는 용어이다. Fig. 6은 감속해석을 수행하기 위하여 입력한 경계조건을 보여준다. CHECWOKRS와 같은 다른 프로그램은 수화학 해석과 열수력해석을 별도로 수행한 후 감속해석을 수행하는 3가지 단계로 수행되지만 ToSPACE에서는 수화학해석, 열수력해석 및 감속해석이 동시에 수행된다 [4]. 또한 유체가 2상(Two Phase)이거나 유체에 고체입자가 포함되어 있을 경우에는 유동가속부식 이외에 액적충돌침식과 고체입자침식에 대한 해석이 동시에 수행된다. 물론 단상 유체 조건이라면 캐비테이션 및 플래싱 해석도 동시에 수행된다.

Fig. 7은 FACTS 설비로 실험한 결과와 비교하기 위하여 감속해석을 수행한 결과 화면을 보여준다. ToSPACE에서는 위에서 언급한 모든 손상 메커니즘에 대하여 해석이 수행되지만 실험설비에서는 FAC 실험만 수행하였기에 FAC 해석결과만을 제시하였다. Fig. 7에서 배관의 컬러는 감속률의 정도를 나타낸다. 즉, 붉은 색일수록 감속률이 크고 노란색은 감속률이 적다는 것을 의미한다. 그림에서 오리피스를 제외하고는 2개의 엘보우에서 감속률이 가장 크게 계산된 것을 알 수 있다.

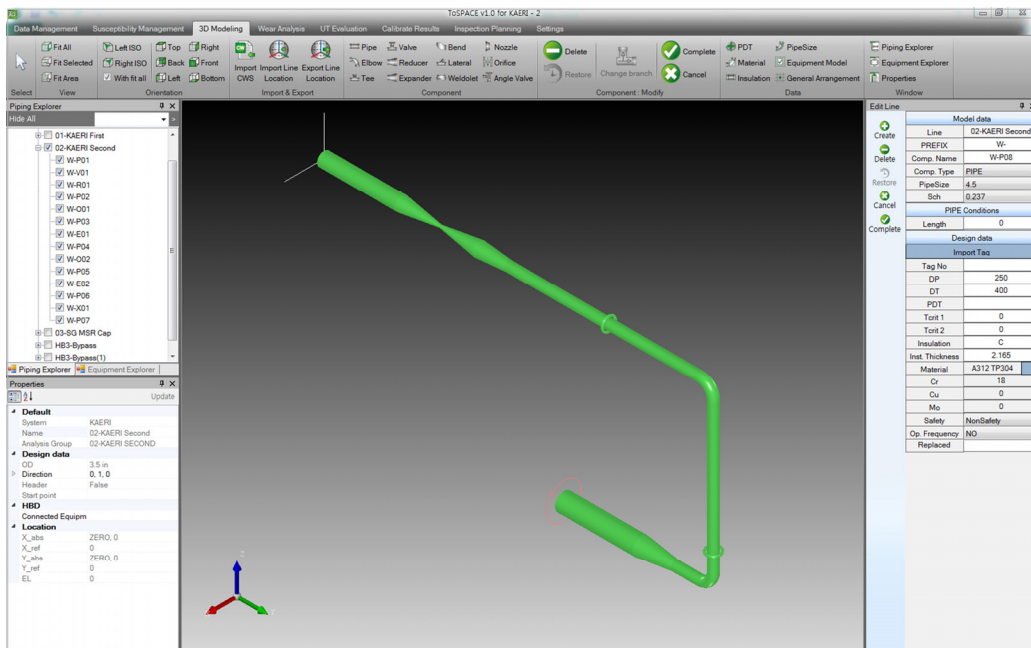


Fig. 5 3D model for ToSPACE analysis.

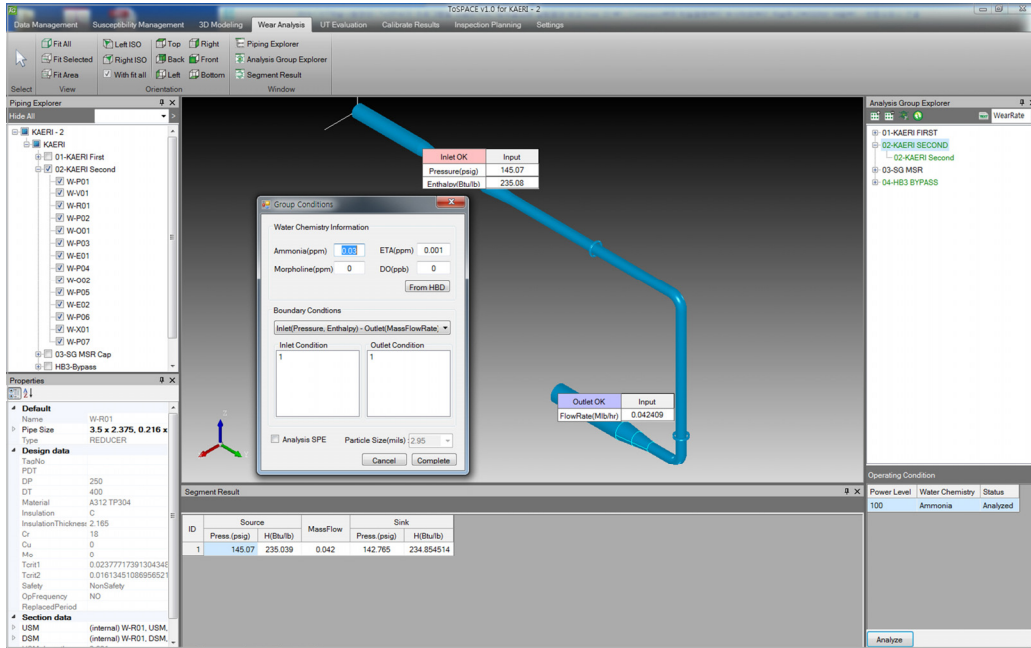


Fig. 6 Setting of Boundary condition for ToSPACE analysis.

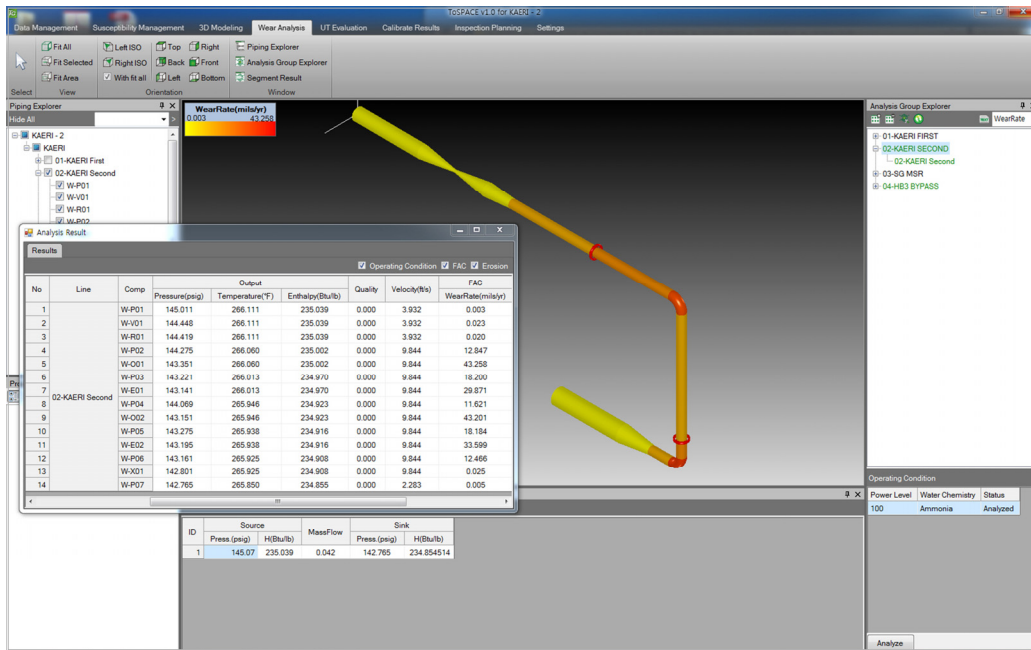


Fig. 7 FAC analysis results using ToSPACE.

#### 4. 실험 및 해석결과 비교

FACTS 설비로 실험한 결과와 ToSPACE를 이용한 FAC 해석결과를 비교하였다. 비교한 부위는 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 4개 부위(W-P03, W-E01, W-P04, W-E02)이다. Fig. 9는 4개 부위를 대상으로 실험 결과와 ToSPACE

해석결과를 비교한 것이다. 그림에서 막대그래프는 실험결과이고 선그래프는 ToSPACE 해석결과이다. 막대그래프 우측의 치수선은 실험에서 두께를 측정할 수 백 개의 포인트에서 계산한 감육률 분포(최대 및 최소값)를 보여주고, 막대그래프는 해당 컴포넌트의 평균 감육률이다. 실험과 해석에서 감육률이 가장 큰 컴포넌트는 W-E02로서 전단의 오

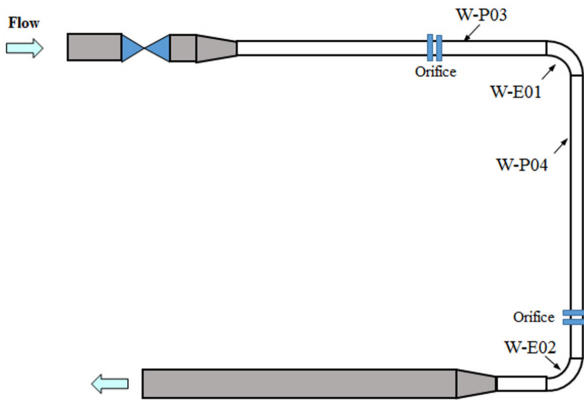


Fig. 8 Comparison parts between ToSPACE and experimental results.

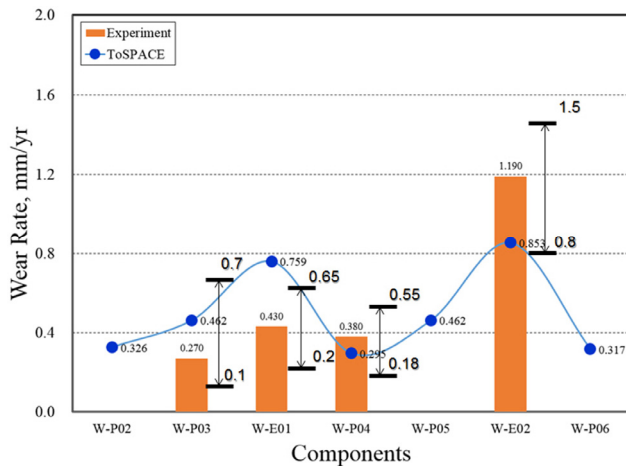


Fig. 9 Comparison of Wear rates derived from ToSPACE analysis and experiment.

리피스와 엘보우에서 발생하는 난류 때문인 것으로 추정된다. 그리고 감육률이 가장 작은 컴포넌트는 W-P03으로 실험에 의한 감육률이 예측값보다 작게 계산되었으나 특정 포인트서는 예측값 보다 훨씬 크게 계산된 경우도 있었다. 그리고 W-P04는 전단의 엘보우에서 발생한 난류의 영향으로 감육률이 다소 크게 나타나고 W-E01은 다소 멀리 떨어진 오리피스 영향과 자체 엘보우 형상 때문에 감육률이 W-P04에 비해 크게 나타난 것을 알 수 있다.

결과적으로 ToSPACE에서 감육률이 크게 계산된 컴포넌트의 순위는 W-E02 > W-E01 > W-P04 > W-P03 차례이며, 이러한 경향은 FACTS의 실험결과에서도 유사하게 나타났다. 또한 ToSPACE 예측 결과는 W-E01을 제외하고는 실험결과의 최대값과 최소값 범위 이내에 있기 때문에 예측결과도 상당히 신뢰할 만한 수준인 것으로 추정된다. W-E01의 경우에는 ToSPACE가 오리피스 후단에서 발생하는 감육의 영향을 다소 크게 반영하고 있는 것으로

나타났으며, W-E02에서는 실험 수행시에 미약하게 발생한 캐비테이션의 영향이 감육에 영향을 미친 것으로 추정된다. 발전소에서는 FAC 예측 결과에 따라 취약한 것으로 추정되는 부위를 초음파탐상검사(UT)로 두께를 검사하고 필요시 정비 또는 교체하기 때문에 ToSPACE로 예측한 결과에 따라 발전소의 배관두께 검사를 수행할 경우 배관감육 관리의 신뢰성을 상당히 높일 수 있을 것으로 추정된다.

## 5. 결론

최근 한국전력기술(주)에서는 발전소 2차측의 배관감육을 예측 및 관리할 수 있는 ToSPACE 프로그램을 개발하였다. 동 프로그램은 발전소 현장의 사용자 편의 관점에서 개발한 것으로서 가장 최신의 기법들을 포함하고 있다. 대표적인 기능으로는 3D 작성과 동시에 DB를 구축하는 기능, 수화해석, 열수력해석 및 감육해석(FAC, LDIE, SPE, Cavitation, Flashing)을 동시에 수행하는 기능, UT 데이터 신뢰도 분석 기능, UT 평가기능, 중장기 검사계획 자동 수립 기능 등이 있다.

본 논문에서는 ToSPACE의 감육예측 메커니즘 중 발전소에서 가장 많이 발생하는 유동가속부식의 예측 정확성을 검증하기 위하여 한국원자력연구원에서 개발한 FACTS 설비로 실험한 결과와 비교하였다. FACTS 설비에서 구성된 배관라인과 동일하게 ToSPACE로 모델링하여 엘보우와 오리피스 후단을 포함한 탄소강 배관 4개 컴포넌트에 대하여 감육률을 비교하였다. 그 결과, 컴포넌트별 감육경향은 실험결과와 유사하게 나타났고, 3개소의 컴포넌트에서 계산된 감육률은 실험에서 나타난 최대값과 최소값 사이에 존재하는 것으로 나타났다. 결과적으로 ToSPACE의 FAC 예측 결과는 충분한 신뢰성을 갖고 있는 것으로 입증되었다. 또한 ToSPACE는 발전소 현장에서 배관감육 관리업무를 수행하는 편의성 관점에서 개발된 프로그램이기에 현장에서 본 프로그램을 활용할 경우 업무의 효율성을 극대화할 수 있고 배관의 건전성을 높이는 데도 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

## References

1. EPRI, TR-1011231J, J. Horowitz, Recommendations for controlling cavitation, flashing, liquid droplet impingement erosion, and solid particle erosion in nuclear power plant piping systems, Final Report (2004).
2. NRC Bulletin 87-01, Thinning of pipe walls in nuclear power plants (1987).
3. Maeda and Amano, Automatic Shutdown of Unit 3 - 4th Report, NISA/METI Press Release (2004).

4. K. M. Hwang, H. Yun, H. K. Seo, G. Y. Lee, and K. W. Kim, *World J. Nucl. Sci. Technol.*, **9**, 1 (2019).  
<https://doi.org/10.4236/wjnst.2019.91001>
5. KAERI, KAERI/TR-7513/2018, Pipeline FAC evaluation technology using asymmetric flow analysis, Technical Report (2018).
6. K. M. Hwang, H. Yun, and H. K. Seo, *Corros. Sci. Tech.*, **17**, 317 (2018).  
<https://doi.org/10.14773/cst.2018.17.6.317>