

원전 2차측 배관 감육여부 판별을 위한 Total Point Method 전산 알고리즘 개발

오영진[†]·윤훈*·문승재**·한경희***·박병욱***

Development of Numerical Algorithm of Total Point Method for Thinning Evaluation of Nuclear Secondary Pipes

Young Jin Oh[†], Hun Yun*, Seung Jae Moon**, Kyunghye Han*** and Byeong Uk Park***

(Received 4 November 2015, Revised 26 November 2015, Accepted 7 December 2015)

ABSTRACT

Pipe wall-thinning by flow-accelerated corrosion (FAC) and various types of erosion is a significant and costly damage phenomenon in secondary piping systems of nuclear power plants (NPPs). Most NPPs have management programs to ensure pipe integrity due to wall-thinning that includes periodic measurements for pipe wall thicknesses using ultrasonic tests (UTs). Nevertheless, thinning evaluations are not easy because the amount of thickness reduction being measured is often quite small compared to the accuracy of the inspection technique. U.S. Electric Power Research Institute (EPRI) had proposed Total Point Method (TPM) as a thinning occurrence evaluation method, which is a very useful method for detecting locally thinned pipes or fittings. However, evaluation engineers have to discern manually the measurement data because there are no numerical algorithm for TPM. In this study, numerical algorithms were developed based on non-parametric and parametric statistical method.

Key Words : Pipe wall thinning (배관감육), Thinning evaluation (감육평가), Total point method (전체측정점 평가법), Numerical algorithm (수치 알고리즘)

1. 서론

탄소강 및 저합금강으로 제작되는 원전 2차측 배관은 유동가속부식(FAC) 및 기타 침부식 등의 열화 기구에 의해 지속적으로 배관 두께가 감소(감육)하는 현상이 발생하고 있다. 이 같은 배관감육에 의해 국내외 원전에서는 2차측 배관의 파열사고가 발생한 바 있다.^{(1),(2)} 배관감육에 의한 파열사고를 방지하기 위하여 배관감육 열화기구에 대한 다양한 연구들이

수행된 바 있으나, 재료 및 운전환경에 따른 배관 부위별 감육속도를 예측하는 것만으로는 배관 파열을 방지하는데 한계가 있는 것으로 인식되고 있다.⁽³⁾ 미국 전력연구원(EPRI)에서는 배관감육에 의한 파열사고를 방지하기 위한 관리방안의 하나로써 적절한 검사 프로그램의 필요성을 강조하였다.⁽⁴⁾

배관 두께를 정확하게 측정할 수 있고 초기 제작 두께를 알 수 있다면, 시간에 따라 측정된 배관 두께 값을 기준으로, 해당 부위에 대한 감육속도 및 수명 만료시점 등을 결정하는 것은 어렵지 않다. 하지만, 현재 적용되고 있는 초음파(UT) 두께측정 방법을 기준으로 할 때, 실제 감육량 대비하여 인적오류 등 두께측정 값의 신뢰도가 충분히 높지 않기 때문에, 감육발생여부 및 감육속도를 결정하는 것이 쉽지 않다

[†] 회원, 한국전력기술(주) 미래전력기술연구소
yjoh2@kepeco-enc.com

TEL: (054)421-6463 FAX:(054)421-6462

* 한국전력기술(주) 재료기술그룹

** 한양대학교 기계공학부

*** 서울대학교 통계학과

는 문제가 있다. EPRI에서는 감육발생 여부를 판별하는 방법으로서 Total Point Method(TPM)를 제안한 바 있으나, 판별에 대한 전산 알고리즘이 제시되어 있지 않기 때문에, 측정값에 대한 히스토그램을 담당 기술자가 수동으로 판별하여 한다는 어려움이 있다.

본 연구에서는 통계학적 방법론을 이용하여 TPM에 대한 수치적 판별 알고리즘을 개발하고 판별성능을 정량적으로 분석하였다.

2. Total Point Method

일반적으로 원전 2차측 배관에 대한 두께감육을 관리하기 위해서 해당 기기에 그리드를 표시하고, 운전시간에 따라 위치별로 두께를 측정한다.(그림 1 참조) TPM은 해당 기기의 각 그리드에서 측정된 두께감육(또는 감육속도) 값들에 대한 히스토그램의 형상특성을 통하여 해당 기기의 감육발생여부 및 감육발생 특성을 예측하는 방법이다.

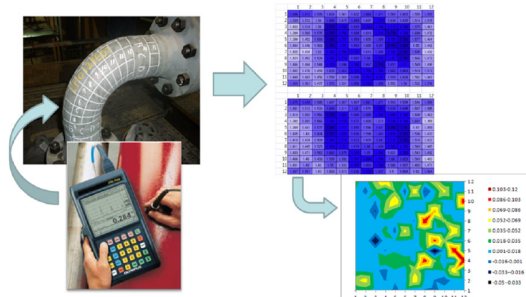


Fig. 1 Pipe thinning management by UT thickness measurements

EPRI 보고서5에서는 감육량 히스토그램의 형상특성을 그림 2와 같이 분류하여, 형상특성에 따른 감육 발생 특성을 아래와 같이 정리하였다. (그림 2 참조)

- Case-1 : 히스토그램 중간값이 명확히 0보다 큼. 상당수 데이터가 최대감육값 근처에 존재
→ 명확히 감육
- Case-2 : 히스토그램이 2개의 최빈값을 가짐. 한개 최빈값은 0 근처. 한개 최빈값은 0보다 큼
→ 명확히 감육 (국부감육)
- Case-3 : 히스토그램 중간값이 0근처 또는 0보다 작음. 최대 감육속도 근처에 데이터가 모인 형태가 없음
→ 명확히 미감육

- Case-4 : 히스토그램 형상이 Case-2 및 3의 경우와 유사. 중간값이 미세하게 0보다 크고 최대감육속도 근처에 미세하게 일부 데이터가 모여 있음 (감육률 1.1~1.7 영역을 두 번째 최빈값으로 볼 수도 있음)
→ 감육의심

TPM이 제안되기 전까지, EPRI에서 제안했던 감육속도 및 감육여부 평가법들은 모두 최대값 또는 최빈값 등 전체 그리드 측정값에 대한 특정 대푯값을 중심으로 평가하는 방법들이었다. 하지만, TPM은 기존 방법들과는 달리 그리드 전체에서 측정된 값들의 분포 특성을 이용한다는 점에서 보다 개선된 방법론이라 할 수 있다. 특히, 상기의 Case-2의 경우 최빈값, 즉 히스토그램상의 피크 개수를 기준으로 해당 기기의 국부감육 발생여부를 평가한다는 점은 기존에 제시된 방법론에 비해 크게 발전했다고 볼 수 있다.

하지만, 상기와 같은 판별기준만으로는 전산프로그램을 이용한 판별이 어렵다. 검사된 모든 기기에 대한 감육 히스토그램을 전산프로그램이 보여줄 수는 있지만, 결국 담당 엔지니어는 모든 히스토그램을 일일이 수작업으로 확인하고 판별을 내려야 한다. EPRI 보고서에서도 설명한 바와 같이, 히스토그램은 계급간격 등의 특성에 따라 형상이 다소 불분명하게 나타날 수 있으며, 개별 엔지니어가 판별할 경우 판별 일관성에도 문제가 발생한다.

Case-1 및 3의 경우 히스토그램 중간값 및 평균값 등을 이용하여 간략하게 평가할 수 있으며, 이는 기존에 제시되어 사용되고 있는 AD PTP (average delta point-to-point) 방법 등과 큰 차이가 없다. 실질적으로 TPM의 가장 중요한 의미는 Case-2에 있다고 볼 수 있는데, 바로 이 판별이 간략하게 전산화하기 어려운 부분이라 할 수 있다. 본 연구에서는 TPM Case-2, 즉, 2개의 최빈값을 갖는지를 판별하는 전산 알고리즘을 개발하고자 한다.

해당 데이터의 분포 특성이 2개의 최빈값, 즉 2개의 모드를 갖는지를 판별하는 방법으로 크게 두가지 방법론을 고려할 수 있다. 한가지는 비모수적 판별방법으로서, 해당 데이터의 분포함수 형태를 특정짓지 않고 확률밀도함수(pdf, probability density function) 또는 누적분포함수(cdf, cumulative distribution function)의 형태 특성만으로 이중모드 존재 여부를 판별하는 방법이다. 또 한가지는 모수적 판별방법으로서,

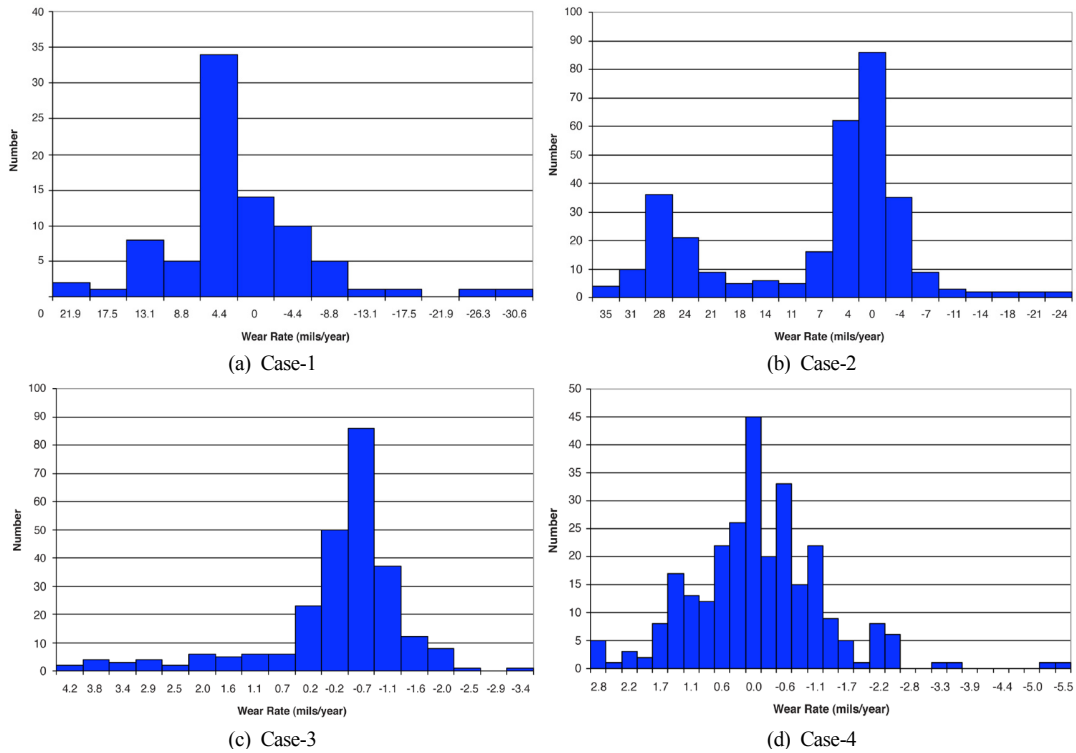


Fig. 2 Histogram classification according to TPM5

해당 데이터의 분포함수 형태를 특징지은 후 해당 분포함수의 모수를 추정함으로써 이중모드 존재 여부를 판별하는 방법이다. 본 연구에서는 비모수적 방법 및 모수적 방법을 모두 시도하여 최적 방법을 도출하였다.

3. 비모수적 판별 알고리즘

이중모드 또는 다중모드 존재 여부를 확인할 수 있는 비모수적 판별방법론⁽⁶⁾으로서, 크게 세가지 방법론을 고려하였다. Dip test⁽⁷⁾, Mode existence test⁽⁸⁾ 및 Bandwidth test⁽⁹⁾ 방법론을 검토하였으며, 각 방법론별 판별성능 등을 종합적으로 고려하여 본 연구에서는 Bandwidth test 방법론을 적용하기로 하였다. 각 방법론별 판별성능 등 상세 사항은 생략하기로 하며, 본 항에서는 Bandwidth test 방법론을 간략히 소개하기로 한다. 본 방법론을 적용한 감육여부 판별성능에 대해서는 5절에서 설명하였다.

Bandwidth test는 커널추정량을 이용하여 모함수가 k개 이하의 모드를 갖는지 혹은 (k+1)개 이상의 모드를 갖는지를 평가하는 가설검정 방법이다. 이때 k값

은 사용자가 결정할 수 있으며, 본 연구에서는 k=1로 설정할수 있다. 본 평가법에서 모집단의 확률밀도함수 f에 대하여 아래와 같이 귀무가설 및 대립가설을 정의한다.

- 귀무가설 : f는 1개 모드를 갖는다.
- 대립가설 : f는 2개 이상의 모드를 갖는다.

상기 가설을 검정하기 위하여 Bandwidth test에서는 커널추정량을 이용하는데, 커널추정량은 일반적으로 평활모수에 따라 달라질 수 있다. 본 방법에서는 이를 고려하기 위하여 k-critical bandwidth 라는 개념을 도입하고 있으며, 이 값이 크면 클수록 대립가설을 지지한다는 특성을 이용하여 상기 귀무가설을 검정한다.

상기에 설명한 커널추정량 및 k-critical bandwidth 값들을 계산하여 유의확률을 계산할 수 있는데, 이 과정들은 통계학적으로 매우 복잡한 과정이므로 상세 사항에 대한 설명은 생략하기로 한다.

4. 모수적 판별 알고리즘 개발

모수적 방법을 이용하여 해당 데이터의 이중모드

존재 여부를 판별하기 위해서는 먼저 해당 데이터의 이중모드 분포함수의 형태를 결정하여야 한다. 일반적으로 두께측정에 대한 오차가 정규분포를 따른다고 가정하게 되면, 두께감소(감육)값 역시 정규분포를 갖게 된다. 국부적인 감육이 특정부위에서 step 함수로 존재한다고 가정하면, 감육측정값은 2-혼합 정규분포를 갖게 된다. 2-혼합정규분포 확률밀도함수(pdf)는 아래와 같이 표현된다.

$$pdf = (1 - A)N(\mu_1, \sigma) + (A)N(\mu_2, \sigma) \quad (1)$$

여기서, A는 정규분포의 혼합비를 나타내며, μ_1 및 μ_2 는 두 개 정규분포의 평균값을 각각 나타낸다. σ 는 정규분포의 표준편차를 나타내며, 본 연구에서는 두 개 정규분포의 표준편차가 동일하다고 가정하였다. 이는 감육부 및 미감육부에서 두께측정 오차가 큰 차이가 없다는 가정에 기반을 두고 있다. 2-혼합정규분포의 일반적인 분포함수 형상을 그림 3에 나타내었다.

4.1 2-혼합정규분포의 모수 추정 절차 개발

모수적 방법으로 감육발생 여부를 추정하기 위해서는, 먼저 상기 2-혼합정규분포의 모수를 결정하는 절차가 개발되어야 한다. 분포함수의 모수를 결정하는 방법으로는 최소자승법(least squares method) 및 최대가능도법(maximum likelihood method) 등을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 확률밀도함수를 이용한 최소자승법, 누적분포함수를 이용한 최소자승법 및 최대가능도법을 시험적으로 적용해 보았다. 먼저 2-혼합정규분포를 따른 난수 데이터를 이용하여 최소자승 곡선적합 방법을 시험하였으나, 반복계산(iterative calculation) 과정에서 초기값 선정에 따른 민감도가 매우 크고, 경우에 따라 수렴성이 매우 좋지 않음을 확인하였다.

최대가능도법은 통계학에서 분포함수의 모수를 결정하는 방법으로 가장 널리 사용되는 방법이다. 본 연구에서는 표본 데이터가 혼합정규분포의 혼합비 정보를 포함하고 있다고 가정하고 정규분포에 사용할 수 있는 최대가능도법 반복계산 절차를 응용하여 2-혼합정규분포의 모수결정 절차를 아래와 같이 적용하였다.

- 1) 초기값 ($\hat{\mu}_1^{(0)}, \hat{\mu}_2^{(0)}, \hat{\sigma}^{(0)}, \hat{A}^{(0)}$)를 지정
- 2) m을 증가시키면서, 아래의 계산과정을 반복

$$\begin{aligned}
 - T_{j,i}^{(m)} &\leftarrow \frac{\hat{A}_j^{(m)} \varphi(x_i; \hat{\mu}_j^{(m)}, \hat{\sigma}^{(m)})}{\hat{A}_1^{(m)} \varphi(x_i; \hat{\mu}_1^{(m)}, \hat{\sigma}^{(m)}) + \hat{A}_2^{(m)} \varphi(x_i; \hat{\mu}_2^{(m)}, \hat{\sigma}^{(m)})} \quad (2) \\
 &\text{for } j = 1 \sim n \\
 &\text{where } \hat{A}_1^{(m)} = 1 - \hat{A}^{(m)}, \quad \hat{A}_2^{(m)} = \hat{A}^{(m)} \\
 - \hat{A}^{(m+1)} &\leftarrow \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{2,i}^{(m)} \\
 - \hat{\mu}_1^{(m+1)} &\leftarrow \frac{\sum_{i=1}^n T_{1,i}^{(m)} x_i}{\sum_{i=1}^n T_{1,i}^{(m)}}, \quad \hat{\mu}_2^{(m+1)} \leftarrow \frac{\sum_{i=1}^n T_{2,i}^{(m)} x_i}{\sum_{i=1}^n T_{2,i}^{(m)}} \\
 - \hat{\sigma}^{(m+1)} &\leftarrow \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 T_{j,i}^{(m)} (x_i - \hat{\mu}_j^{(m+1)})^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 T_{j,i}^{(m)}}}
 \end{aligned}$$

3) 2)의 과정을 m을 증가시키면서, 최대가능도 값이 수렴할때까지 반복

여기서, i는 평가대상 측정 데이터의 개수이며, \hat{x} 는 변수 x에 대한 추정값을 나타낸다. $\varphi(x; \mu, \sigma)$ 는 평균 μ , 표준편차 σ 인 정규분포에서 x에서의 확률밀도 값을 나타내며, 함수 T는 최대가능도 계산을 위해 정의한 매개함수이다.

4.2 모수분석을 통한 이중모드 판별절차 개발

분석 대상 데이터가 이중모드 특성을 갖고 있는지 판단하기 위해서는 단일모드 데이터에 대하여 결정된 모수와 이중모드 데이터에 대하여 결정된 모수가 어떤 차이를 나타내는지 알아야 한다. 그 차이가 크면 클수록 이중모드 판별성능이 높게 나타날 것이며, 차이가 작은 경우 판별에 실패할 확률이 증가하게 된다. 단일모드 데이터 및 이중모드 데이터로부터 결정되는 모수의 특성을 이해하기 위하여 아래와 같은 난수에 대하여 모수추정 확률실험을 수행하였다. 사용된 난수의 모분포를 다음과 같이 설정하였다.

- 단일정규분포 1개 경우
 - : A=0, $\mu_1=0, \sigma=1$
- 2-혼합정규분포 총 15개 경우
 - : A=0.1, 0.2, 0.3, $\sigma=1$
 - $\mu_1=0, \mu_2=1, 2, 3, 4, 5$
- 각 경우별 표본크기 3개 경우
 - : 50개, 100개 및 200개

상기에 설명된 단일 또는 2-혼합정규분포의 분포 함수 형상을 그림 3에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이, 혼합비(A)가 크고, μ_2 와 μ_1 의 차가 클수록 분포함수의 이중피크가 더 선명하게 나타나며, 따라서 이중모드로 판별될 확률도 높을 것으로 추정할 수 있다.

상기 총 48가지 경우에 대하여 각각 1000회의 확률실험을 수행하였으며, 그 중 표본크기 100의 경우에 대한 확률실험 결과의 일부를 그림 4에 요약하여 나타내었다. 그림에서는 2-혼합정규분포의 혼합비 A 및 두 정규분포의 평균차 $(\mu_2-\mu_1)/\sigma$ 의 결정결과를 나타내었으며, $(\mu_2-\mu_1)/\sigma \geq 4$ 인 경우 모분포의 모수를

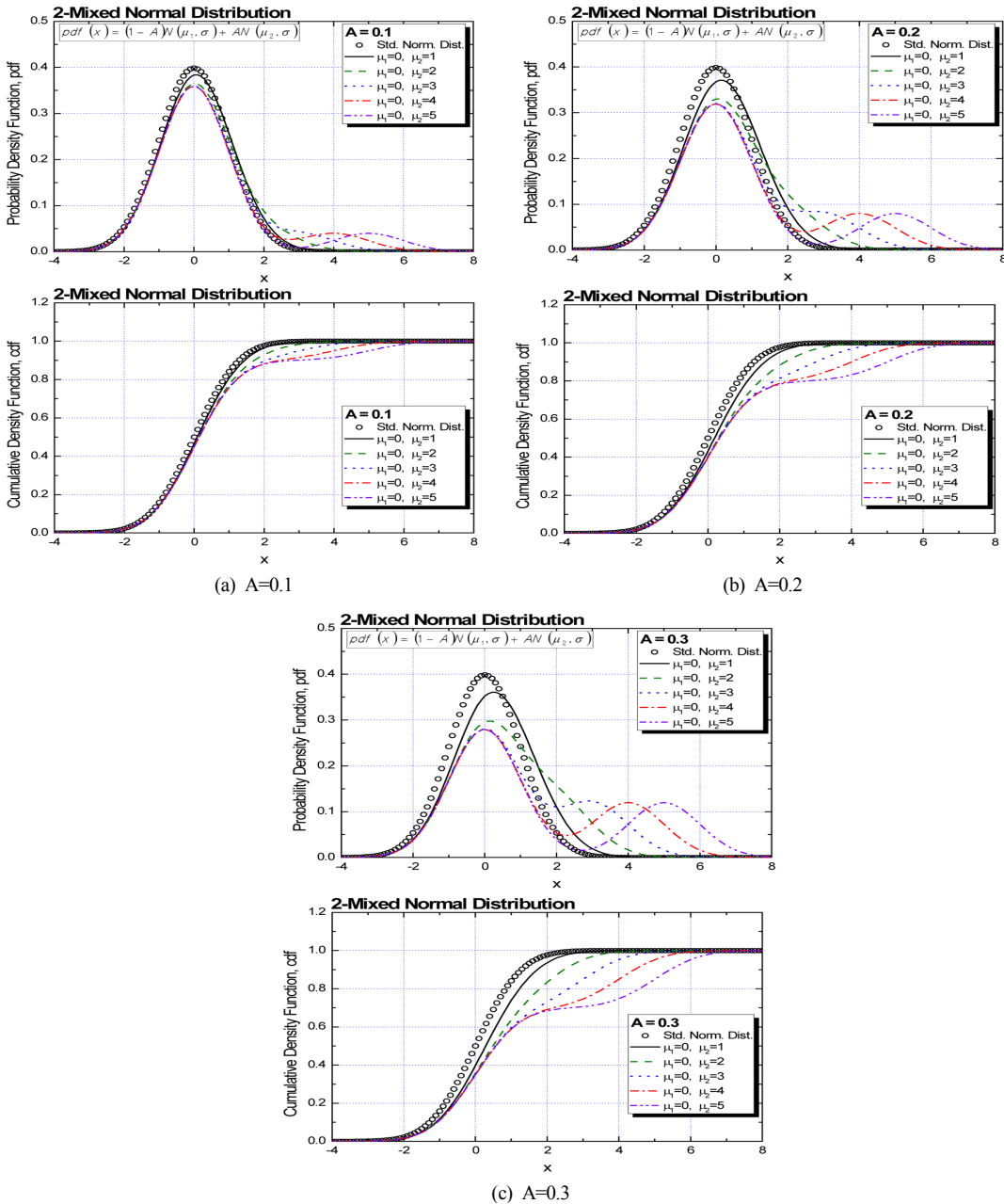


Fig. 3 Probability distribution function of 2-mixed normal distribution

매우 잘 추정하고 있음을 알 수 있다. 그러나, $(\mu_2 - \mu_1) / \sigma < 4$ 인 경우 추정된 모수가 매우 큰 분산을 나타내고 있으며, 단일정규분포($A=0$)인 경우에도 A 및 $(\mu_2 - \mu_1) / \sigma$ 값이 매우 넓은 범위에 흩어져 나타남을 알 수 있다. 이는 2-혼합정규분포가 단일정규분포가 되기 위한 해가 $A=0$ 또는 $(\mu_2 - \mu_1) / \sigma = 0$ 로서 부정해를 갖기 때문이다. 또한 A 및 $(\mu_2 - \mu_1) / \sigma$ 의 값이 작은 경우 분포함수 형태상 (그림 3 참조) 이중모드의 특성이 뚜렷하게 나타나지 않기 때문이기도 하다.

결정(추정)된 모수에 대한 이중모드 판별기준을 선정하여야 하는데, 판별기준에 의하여 단일정규분포 데이터가 이중모드 데이터로 잘못 판단되는 경우를 최소화하여야 한다는 점을 중요하게 고려하여야 한다. 단일정규분포 데이터가 이중모드 데이터로 잘못 판단된다는 것은 미감육 배관 데이터를 국부감육 데이터로 판별함을 의미하는데, 이는 재검사 해당 기기의 개수를 지나치게 증가시켜 감육관리 효율성을 크게 저해하는 결과로서 반드시 피해야 하는 사항이다.

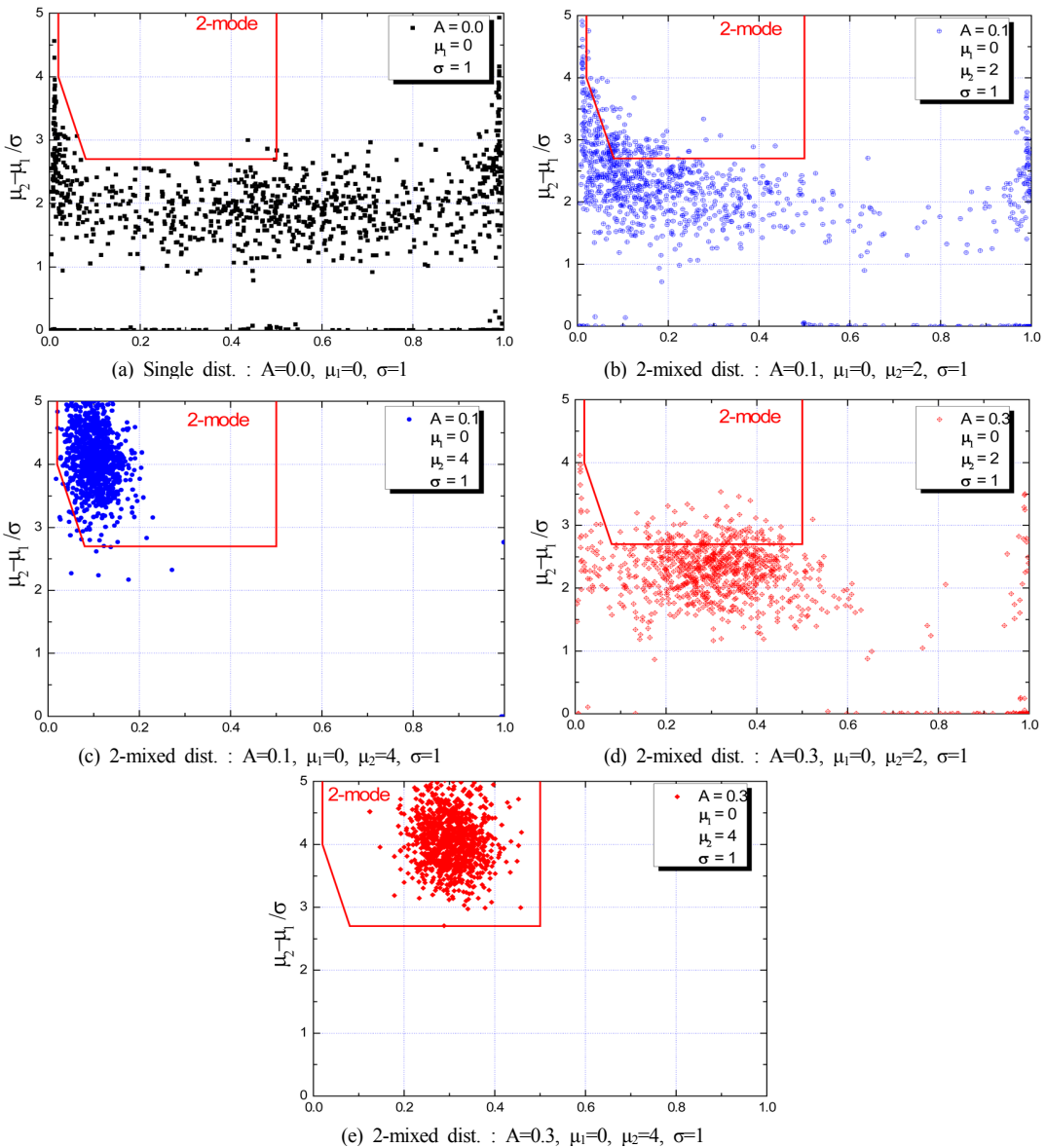


Fig. 4 Random experiment results for parameter determination of 2-mixed normal distribution

상기의 사항을 고려하여, 단일정규분포 데이터에 대한 모수추정 영역을 회피할 수 있는 가장 적절한 경계선을 결정할 수 있으며, 이를 그림 4에 붉은색 실선으로 표시하였다. 이 경계선은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{if } & A < 0.02 & \text{or} \\ & A > 0.5 & \text{or} \\ & (\mu_2 - \mu_1) / \sigma < 2.7 & \text{or} \\ & (\mu_2 - \mu_1) / \sigma < 4.43 - 21.67A \text{ 이면,} \end{aligned}$$

단일모드 (균일감육 또는 미감육)

그림 4에 나타난 바와 같이, 상기의 판별기준을 적용할 경우, A 및 $(\mu_2 - \mu_1) / \sigma$ 가 클수록 판별성공확률이 높으며, 특히 $(\mu_2 - \mu_1) / \sigma \geq 4$ 인 경우 판별성공확률이 100%에 가깝게 나타남을 알 수 있다.

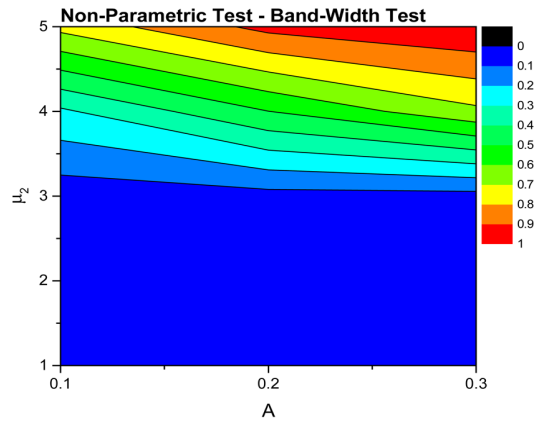
5. TPM 최적 전산알고리즘

5.1 최적 전산알고리즘 도출

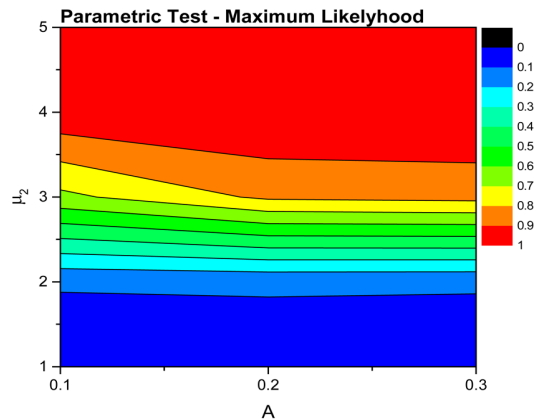
상기 3절 및 4절에서 개발된 비모수적 및 모수적 이중모드 판별절차를 이용하여 판별성능을 정량적으로 비교하였다. 비교를 위한 데이터는 2-혼합정규분포로부터 추출되었으며, 앞서 고려되었던 15가지 (A 3가지 \times μ_2 5가지)의 모분포에 대하여 분석을 수행하였다.

15가지 각 경우별로 1000세트의 난수를 생성하여, 비모수적 및 모수적 방법으로 이중모드 여부를 판별하는 확률실험을 수행하였다. 확률실험 결과에 따른 이중모드 판별확률을 컨투어맵으로 표현하여 그림 5에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이, 2-혼합정규분포 데이터에 대한 이중모드 판별성공확률은 혼합비 A보다 μ_2 또는 $(\mu_2 - \mu_1) / \sigma$ 의 영향이 훨씬 크게 나타났다. $\mu_2 = 5$ 인 경우, 비모수적 평가법의 판별확률이 10% 미만인 반면, 모수적 평가법의 판별확률은 60% 이상을 기대할 수 있다.

비모수적 평가법과 모수적 평가법의 이같은 판별성능 특성은, 분석대상이 2-혼합정규분포를 모분포로 갖는 데이터라는 영향도 배제할 수 없으나, 일반적으로 비모수적 평가의 신뢰도를 확보하기 위해서는 상당히 큰 표본크기가 필요한 특성의 영향도 클 것으로 추정된다. 현재 원전 산업계에서 적용되고



(a) Non-parametric test



(b) Parametric test

Fig. 5 Test success probability for 2-mode existence

있는 기기별 측정개수(그리드 개수)를 고려할 때, 100~200개 이상의 표본크기를 기대하기 어려우며, 따라서 본 판별확률실험은 표본크기 100을 기준으로 수행하였다.

현재의 감육배관 두께측정 현황을 고려할 때, 상기 확률실험 결과와 같이 모수적 평가법이 더 좋은 판별성능을 발휘할 것으로 기대할 수 있다. 다만, 추후 조밀그리드에 대한 두께측정 등 측정개수가 증가하는 경우 비모수적 평가법을 적용하는 방안도 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

5.2 가상 국부감육배관에 대한 판별성능

본 연구에서는 원전 배관 두께측정 자료를 이용하여 2-혼합정규분포 모수 추정을 통한 국부감육 발생 여부를 판별하는 방법론을 개발하였다. 하지만, 두께 측정에서 나타나는 오차와 국부감육의 발생량에 따

라 판별에 성공할 수도 있고 실패할 수도 있다. 본 항에서는 가상의 국부감육배관에 대하여, 본 평가법의 판별성공확률을 정량적으로 제시하기 위한 확률 실험을 수행하였다.

국부감육배관으로서 외호부의 일부 영역이 감육된 엘보를 평가대상으로 선정하였다. 그림 6에 나타난 바와 같이, 엘보 외호부의 국부감육 영역은 엘보 원주방향으로는 R₁의 곡률반경을 갖고, 엘보 길이방향으로는 R₂의 곡률반경을 갖도록 하였다. R₁ 및 R₂ 값은 최대감육깊이(t_{thin,max}), 감육길이(l) 및 감육폭(w)에 따라 결정될 수 있으며, 결정된 R₁ 및 R₂에 따른 위치별 감육량 분포식을 그림 6에 함께 나타내었다. 그림에 나타난 감육형상을 기준으로 다양한 감육면적 및 최대감육깊이를 고려하였다. 본 연구에서는 12×13 그리드 (측정개수 156개), 공칭경 16인치 엘보를 대상으로 하였다. 측정오차는 관련 최신연구 결과11에 따라 측정표준편차 2.74% (두께기준)을 고려하였다. 본 가상의 감육배관을 대상으로, 감육면적 및 최대감육깊이의 변화에 따른 본 평가법의 판별성공확률 특성을 분석하였다.

가상감육배관에 대한 국부감육 판별성능 확률실험 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이, 감육면적이 10% 이상이고, 최대감육깊이가 20% 이상일 경우 국부감육 판별성공확률이 90% 이상으로 나타났다. 한편, 최대감육깊이가 10% 이하인 경우 감육판별확률이 10% 이하로 낮게 나타났는데, 이는 고려된 측정오차(표준편차 2.74%)의 특성 영향을 클 것으로 추정된다.

한편, 측정오차는 배관의 크기 및 기타 다양한 인자의 영향에 따라 다양하게 나타날 수 있는데, 측정오차와 판별성능의 관계는 아직 충분히 연구된 바 없다. 향후에는 본 사항에 대한 보다 면밀한 검토를 통해, 다양한 평가방법론에 따른 판별성능 정량화 연구에 활용될 필요가 있을 것으로 판단된다.

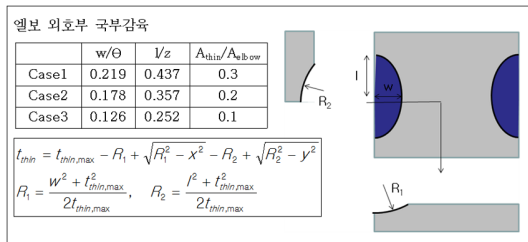


Fig. 6 Postulated thinned elbow for thinning evaluation method performance test

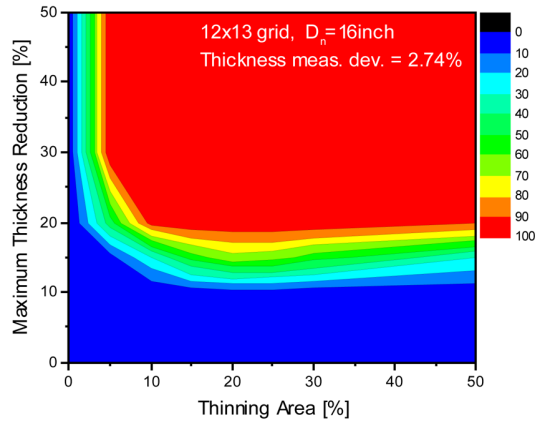


Fig. 7 Test success probability for local thinning evaluation of postulated thinned elbow

6. 결론

본 연구에서는 원전 2차측 배관 감육여부 판별을 위한 Total Point Method 전산 알고리즘을 개발하였다. 전산 알고리즘 개발을 위한 통계학적 방법으로서, 이중모드 판별을 위한 비모수적 평가법과 2-혼합 정규분포를 고려한 모수적 평가법을 각각 개발하였다. 개발된 방법론에 대한 판별성능 예비분석을 통해 모수적 평가법을 최적 방법론으로 도출하였다. 최적 방법론으로 도출된 전산 알고리즘을, 가상의 국부감육배관에 적용하는 확률실험을 수행함으로써, 감육면적 및 최대감육깊이별 감육 판별성공확률을 정량적으로 도출하여 제시하였다.

본 전산 알고리즘은 원전 2차측 배관 감육관리 프로그램에 직접 적용될 수 있으며, 균일감육 판별방법론 등 다양한 평가법과 혼용하여 사용함으로써 전체적으로 감육 판별성능을 크게 향상시킬 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국전력기술(주) 기술개발과제를 통해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) EPRI, 2002, "Flow Accelerated Corrosion in Power Plants," TR-106611-R1.
- (2) EPRI, 1998, "Thinning of Pipe Walls in Nuclear

- Power Plants (NP-6066)," Utility Response to NRC Bulletin 87-01.
- (3) EPRI, 2010, "Mentoring Guide for Flow-Accelerated Corrosion Engineers," *TR-1022295*.
- (4) EPRI, 2013, "Recommendations for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R4)," *TR-3002000563*.
- (5) Horowitz, J. S., 2009, "Statistical Methods for the Analysis of Multiple-Inspection Flow-Accelerated Corrosion Data," *EPRI report 1019175*.
- (6) Wikipedia, "Multimodal distribution," <https://en.wikipedia.org>
- (7) Hartigan, J. A. and Hartigan, P. M., 1985, "The dip test of unimodality", *The Annals of Statistics*, Vol. 13, pp. 70-84.
- (8) Minnotte, M. C., 1997, "Nonparametric testing of the existence of modes", *The Annals of Statistics*, Vol. 25 pp. 1646-1660.
- (9) Silverman, B. W., 1981, "Using kernel density estimates to investigate multimodality", *J. of RSS, Series B*, Vol. 43, pp. 97-99.
- (10) 박홍배 등, 2014, "배관 두께 측정자료의 불확실성을 고려한 감속속도 최적 평가법 개발", 한국전력기술(주) 기술개발과제 보고서.
- (11) Yun, H, Oh, Y. J. and Moon, S. J., 2015, "Development of wall-thinning evaluation procedure for nuclear power plant piping - Part 1 : Quantification of thickness measurement deviation", Submitted to Nuclear Engineering and Technology.