

## 압력용기 수명 평가 기술 및 규격

김 윤 재 · 송 태 광 · 이 국 희

### Life Assessment Procedures and Codes for Pressure Vessels and Piping

Yun-Jae Kim, Tae-Kwang Song and Kuk-Hee Lee

#### 1. 사용적합성 평가의 필요성 및 개념

##### 1.1 정의 및 필요성

일반적으로 압력용기는 설계, 제작 그리고 용접을 거친 뒤 사용하게 된다. 입력용기의 설계, 제작 및 용접은 반드시 관련 기관 혹은 산업체가 허용하는 코드에 따라 수행되어야 하며, 미국의 기계학회 보일러 및 압력용기 코드(ASME BPV; American Society of Mechanical Engineers Boiler and Pressure Vessel Code) 등 다양한 코드가 있다. 이러한 Construction 코드들은 주로 압력용기의 설계와 용접 및 제작에 관련된 기술기준을 제공하며, 미국 ASME BPV 코드의 Sec XI과 같이 가동 중 압력용기의 검사와 관련된 기준을 때로는 제시하기도 한다.

하지만 가동 중인 압력용기의 적절한 관리(Maintenance)는 설계와 제작만큼 중요한 문제이고 최근 대두되는 설비수명연장과 효율적인 관리 측면에서 상당히 중요한 문제로 취급되고 있다. 따라서 가동 중 압력용기의 효율적인 관리를 위해 다양한 기술과 기법이 제시되었고 이를 토대로 최근 다양한 Post-construction 코드가 제시되고 있다. 설비의 효율적인 관리와 설비 수명연장을 통해 비용을 절감하고 산업의 경쟁력을 극대화할 수 있는 Post-construction 코드는 가동 중인 압력용기의 검사 및 진단, 결함 및 구조 건전성 평가, 운전 및 운영과 관련된 방대한 기술을 취급해야 하므로 다양한 형태의 코드로 제시된다. 주로 가동 중인 압력용기의 위험도를 기반으로 관리하는 기법을 제시하는 Risk-Based Inspection(RBI), Risk-Based Maintenance(RBM), Risk-Centered Maintenance(RCM) 등이 있으며, 가동 중인 압력용기에 발견된 결함에 대해 결함이 발견될 시 구조 건전성 평가를 수행하여 계속 운전이 적절한가를 판단하고 나아가서 잔여수명을 평가할 수 있는 사용적합성(Fitness-For-Service; FFS) 코드가 제시되

어 있다.

일반적으로 가동 중 압력용기에서 결함이 발생하면 설계코드의 개념에서는 해당요소를 일괄적으로 교체하거나 보수하여야 한다. 그러나 사용적합성 평가의 개념에서는 균열과 같은 결함이 구조물의 건전성에 미치는 영향을 파악하여 계속 사용 여부 또는 보수 및 교체를 판단할 있으며, 이를 통해 보수적으로 설계된 설비의 수명을 연장하고 효율적으로 설비를 관리할 수 있을 것이다. 따라서 사용적합성 평가의 가장 큰 특징은 결함을 반영하여 설비의 건전성 및 수명을 평가한다는 점이다. 압력용기의 설계 시에는 용기에 요구되는 성능과 관련된 해석과 더불어 사용 시 예상되는 파손기구들(failure mechanisms, 예 침/부식, 피로, 파괴)을 고려하여 역학적 구조해석을 통해 용기의 재료, 형상 및 두께 그리고 수명을 결정한다. 특별한 경우 설계 시 가상결함을 고려하여 건전성평가를 수행하는 경우도 있으나 기본적으로는 설계 시에는 결함을 반영하지 않는다. 결함평가를 수행해야 하는 사용적합성평가에서는 비선형 해석 및 파괴역학 등과 같은 기법을 사용하지만 기본적으로는 설계와 같은 개념을 가지나, 사용목적이 상이함에 따라 설계코드와 사용적합성코드는 적용 시 차별성이 존재한다.

본 고에서는 사용적합성평가를 위한 기존 코드들을 간략히 소개한 뒤 적용 시 설계코드와의 차별성과 관련된 몇 가지 사항을 정리하고자 한다.

#### 2. 사용적합성 평가 코드 현황

현재 미국, 유럽 등의 선진국들을 중심으로 다양한 사용적합성 평가코드가 제시되어 있다. 본 장에서는 이러한 코드 중 몇 가지 코드를 간략히 소개하고자 한다.

##### 2.1 ASME BPV Sec XI

ASME BPV Sec XI (Rules for inservice

inspection of nuclear power plant components)은 경수로원전주요 기기에 대한 가동 중 검사 및 결함에 대한 평가 방법을 제시한다. 예를 들어 경수로에 대한 일반적인 평가절차를 제시한 IWA-xxxx 항목에서는 균열 검사 방법 (IWA-2000), 균열 평가 방법 (IWA-3000), 보수 및 교체 방법 (IWA-4000), 구조물 운전 압력에 대한 평가 방법 (IWA-5000) 등에 대한 지침을 제공한다. 가동 중 검사 시 혹시 발견될 수 있는 결함에 대한 사용적합성 평가와 관련한 기준들은 비강제적인(non-mandatory) 지침을 통해 제시하고 있다. 예를 들어 오스테나이트계 배관의 경우 연성이 매우 좋으므로 한계하중 해석으로 결함에 대한 구조건전성 평가를 할 수 있으며(부록 C) 페라이트계 배관의 경우 간략적인 탄소성파괴역학으로 평가할 수 있다고 제시하고 있다(부록 H). 또한 ASME Sec XI은 파괴인성에 대한 기준 (부록 G) 및 피로 균열 진전에 대한 평가 방법을 제시하고 있다.

2.2 R5/R6

R5/R6코드는 영국전력에서 자체 개발한 사용적합성 평가코드로서 R5코드는 크릴온도 영역에서 가동되는 설비, 그리고 R6코드는 비크릴온도 영역의 평가 기법을 제시하고 있다. 주로 적용대상은 영국에서 가동되는 원전(AGR, Advanced Gas Cooled Reactor)의 주요 기기의 사용적합성과 수명을 평가하기 위해 개발된 코드이지만 적용 기법의 범용성으로 인해 유럽코드(SINTAP/FITNET) 등 다른 많은 코드의 기초가 되고 있다.

2.3 SINTAP/FITNET

유럽연합(EU)에서는 1996년부터 1999년까지 Brite-Euram 프로그램의 일환으로 SINTAP(Structural Integrity Assessment Procedure for European Industry)를 수행하여 유럽연합의 다양한 산업에 적용할 수 있는 결함평가법을 제시하고자 R6코드 평가법을 토대로 유럽의 다양한 산업체에서 자체 개발한 평가기법을 통합하여 유럽내의 표준화된 결함평가 기법을 제시하였다. 또한 2002년부터 2006년까지 수행된 FITNET (Fitness-For-Service Network)과제를 통해 개발된 SINTAP절차 이외에 피로, 크릴, 부식에 대한 평가 기법을 통합하여 유럽표준을 위한 사용적합성평가기법을 제시하였다. 그림 1은 FITNET과제에서 수행된 그룹과 Work Package를 보여준다.

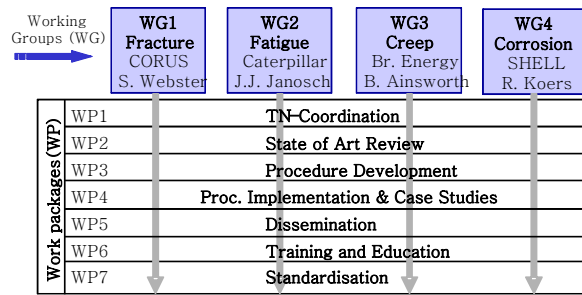


그림 1 FITNET과제의 그룹과 Work package.

2.4 API 579-1/ASME FFS-1 2007

2007년 6월에 미국석유회(American Petroleum Institute, API)와 미국기계학회(ASME)가 공동으로 API 579-1/ASME FFS-1사용적합성 코드를 발간하였다. 이 코드의 주요 적용 유형은 압력 용기, 배관 및 탱크이며, 다양한 산업에 적용되도록 구성되었다. 비균열성(체적) 결함에는 허용 응력법 (allowable stress method)과 소성 붕괴 하중이 평가에 적용되며, 균열성 결함에는 탄소성파괴역학에 입각한 파괴 평가 선도 (Failure Assessment Diagram, FAD)기법이 사용된다.

표 1에 요약된 API 579-1/ASME FFS-1의 목차에서 보는 바와 같이 이 코드에서는 부식에 의한 감육, 피팅, 블리스터 및 수소손상, 용접에 의한 misalignment 및 변형, 균열, 박리, 덴트 및 가우지, 크리프, 화재에 의한 손상 등 다양한 가동 중 발생할 수 있는 파손기구에 대한 평가법을 제시하고 있다. 또한 부록에서는 이러한 평가를 수행할 때 필요한 기초 입력자료(응력해석, 재료물성, 용접잔류응력, 파괴역학매개변수 계산법 등)에 대한 상세한 설명이 제시되어 있다.

3. 적용 시 설계코드와의 차별성

2절에서는 현재까지 개발된 사용적합성평가 코드 중 대표적인 코드를 요약하였다. 본 장에서는 사용적합성평가 코드를 이용하여 압력용기의 계속 사용 가능성 및 수명 평가를 수행 시 설계코드에 입각한 압력용기 설계와의 차별성에 대한 설명을 하고자 한다. 사용적합성평가 코드와 설계 코드는 기본적으로 하중 분석을 통한 응력 해석을 수행하고 이를 재료가 견딜 수 있는 한계(재료 물성)과 비교하는 공학적 평가라는 기본 개념에서는 동일하다고 볼 수 있다. 예를 들면 설계 코드를 이용한 소성붕괴 평가는 사용적합성평가에서의 파괴평가와 기본적 개념은 동일하다. 또한 피로해석을 통한

표 1 API 579-1/ASME FFS-1 목차

Section 1 - Introduction Section 2 - FFS Engineering Assessment Procedures Section 3 - Assessment of Existing Equipment for Brittle Fracture Section 4 - Assessment of General Metal Loss - Limit Load Approach Section 5 - Assessment of Local Metal Loss - Limit Load Approach Section 6 - Assessment of Pitting Corrosion - Limit Load Approach Section 7 - Assessment of Hydrogen Blisters and Hydrogen Damage Associated with HIC and SOHIC Section 8 - Assessment of Weld Misalignment and Shell Distortions Section 9 - Assessment of Crack-Like Flaws - Elastic-Plastic Fracture Mechanics Section 10 - Assessment of Components Operating in the Creep Range - Elastic-Plastic & Creep Fracture Mechanics Section 11 - Assessment of Fire Damage Section 12 - Assessment of Dents, Gouges and Dent-Gouge Combinations - Limit Load Approach Section 13 - Assessment of Laminations
Annex Annex A: Thickness, MAWP and Stress Equations for a FFS Assessment Annex B1: Stress Analysis overview for an FFS Assessment Annex B2: Recommendations for Linearization of Stress Results for Stress Classification Annex B3: Histogram Development and Cycle Counting for Fatigue Analysis Annex B4: Alternative Plasticity Adjustment Factors and Effective Alternating Stress for Elastic Fatigue Analysis Annex C: Compendium of Stress Intensity Factor Solutions Annex D: Compendium of Reference stress Solutions for CRACK-Like Flaws Annex E: Residual Stresses in a Fitness-For-Service Evaluation Annex F: Material Properties for A FFS Assessment Strength Parameters, Physical properties, Fracture toughness, Crack growth Calculations, Fatigue curves, Material data for creep analysis Annex G: Damage Mechanisms Annex H: Technical BASIS and Validation Annex I: Glossary of Terms and Definitions Annex J: Currently Not Used Annex K: Crack Opening Areas

설계수명해석과 피로균열진전해석을 통한 잔여수명계산 또한 동일한 역학적 개념을 가진다. 하지만 동일한 개념을 적용하더라도 설계 코드와 사용적합성평가 코드는 적용하고자 하는 목적이 상이할 수 있어 적용 시 차별성이 존재할 수 있다. 본 장에서는 사용적합성평가 코드가 이와 같이 설계 코드와 비교하여 차별화되는 부분을 중점적으로 살펴보도록 하겠다.

### 3.1 일반성과 특수성

압력용기 설계 시 중요한 점은 객관성과 일관성이라 볼 수 있으며, 이를 위해 의무적으로 설계 코드를 따라야 하는 강제성도 있다. 또한 설계 코드는 일반 엔지니어를 대상으로 만들어졌기 때문에 설계 코드는 검증된 기술을 바탕으로 간결하고 명확해야 작성되어야 한다. 또한 국가와 산업 분야에 상관없이 적용될 수 있어야 한다.

이에 반해 사용적합성평가 코드는 특수성과 주관성을 가진다고 볼 수 있다. 이는 운영 주체와 규제 기관에 따라 자율적으로 코드를 선택하여 적용할 수 있어야 하기 때문이다. 설계 코드의 적용 대상이 일반적인 반면, 사용적합성평가는 특수한 경우 및 대상에만 적용할 수 있다. 예를 들어서 결함의 종류(예: 균열, 감육)와 적

용 대상 및 환경(예: 해양 구조물, 원자력 발전소)에 따라서 사용적합성평가 방법이 조금씩 상이하게 적용될 수 있다.

마지막으로 발견된 결함을 허용하고 계속 사용하는 데는 국가와 산업 분야에 따라 주관적이고 특수적으로 적용될 수 있다. 이러한 이유로 사용적합성평가 코드는 주로 적용 대상 산업 분야, 대상 국가, 사용 주체(사용자)에 따라 만들어지고 선택된다.

### 3.2 사용적합성평가 코드의 사용 주체

일반적으로 설계코드는 검증된 기술을 바탕으로 간결하고 명확해야 작성되므로 일반 엔지니어가 이해하기에 큰 어려움이 없는 공학적 지식을 바탕으로 개발된다. 하지만 결함이 있는 설비의 파괴 거동을 예측하는 것은 비선형응력해석 및 파괴역학 해석과 같이 복잡하고 난해한 기법이 적용될 수 있다. 따라서 사용적합성평가 코드를 적용 시 사용 주체에 따라 적용하는 수준이 달라질 수 있을 것이다.

예로 미국의 API 579/ASME-FFS코드나 유럽의 FITNET코드의 경우 다양한 등급에 따른 해석(multi-level analysis)을 수행하도록 권장하고 있다. 미국의 API 579/ASME-FFS코드의 경우 사용자의 전문적

표 2 FITNET에서 제시하는 입력정보에 따른 사용 등급

Level	Data needed	When to use
Default level	Yield or proof strength	When no other tensile data available
Level I (Basic)	Yield or proof strength; Ultimate tensile strength	For quickest result. Mis-match in properties less than 10%
Level II (Mis-Match)	Yield or proof strength; Ultimate tensile strength, Mis-Match limit loads	Allows for Mis-Match in yield strengths of weld and base material. Use when Mis-Match is greater than 10% of yield or proof strength.
Level III (Stress-strain defined)	Full stress-strain curves	More accurate and less conservative than Levels I and II. Weld Mis-Match option included.
Level IV (Constraint allowance)	Estimation of fracture toughness for crack tip constraint conditions relevant to those of cracked structure	Allows for loss of constraint in thin sections or predominantly tensile loadings
Level V (J-Integral analysis)	Needs numerical cracked body analysis	-
Level VI (Leak before break analysis)	-	Piping and pressure vessel components

지식 정도에 따라, 현장 엔지니어는 간략하고 보수적인 등급 1의 평가 기법을 그리고 전문가는 상세하고 정확한 등급 3의 평가 기법을 사용할 수 있도록 권장한다. 유럽의 FITNET 코드의 경우, 평가는 전문가만이 수행하도록 권장하고, 평가에 필요한 입력 정보의 질이나 양에 따라 다른 등급을 사용하도록 권장한다. 만약 평가를 위한 정보가 제한적일 경우 보수적인 등급 1의 평가 코드를 사용해야 하며, 평가를 위한 상세한 입력 정보가 있다면 입력정보의 질과 양에 따라 더 높은 등급을 사용하도록 권장하고 있다. 그 한 예가 표 2에 주어 져 있다. 만약 재료의 인장물성과 관련된 정보가 최소 요구항복강도(SMYS)만이 존재하는 경우 0등급을 사용하고, 재료에 대한 항복강도와 인장강도가 있는 경우 1등급, 상세한 인장곡선이 있는 경우 3등급, 그리고 전문가에 의해 수행된 비선형수치해석 결과가 있는 경우 5등급을 사용하도록 권장하고 있다.

실제 설비에 결함이 발견되어 사용적합성 평가를 수행해야 하는 경우 가장 큰 문제점은 평가를 위한 입력 정보의 양과 질이라 볼 수 있다. 평가를 위한 입력 정보는 크게 재료물성정보(인장 물성, 파괴인성, 피로물성 등), 하중이력 정보, 용접부를 포함한 구조물 형상 정보 그리고 결함의 형상정보 등으로 구분할 수 있으며, 각 정보의 질에 따라 분류될 수 있다. 예로 인장 물성의 경우 SMYS, 공인된 인장 물성과 실제 평가대상의 특정 인장 물성 등이 있을 수 있을 것이다. 하중의 경우 내압 혹은 시스템하중에 의한 1차 하중과 열하

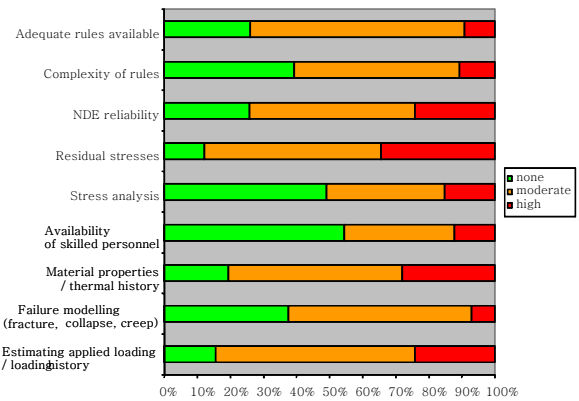


그림 2 사용적합성 평가 적용 시 어려움 (JRC Pattern)

중과 잔류응력과 같은 2차 하중으로 구분되어야 하며, 정상 상태, 과도 상태, 특이 상태에 따른 하중 및 응력의 값이 필요하고, 시간에 따른 하중 정보도 필요하다. 정확한 평가를 위해서는 상세한 입력정보가 필요하나 일반적으로는 상세한 정보를 구하기가 쉽지 않으며, 평가에 주어진 시간을 고려할 때 주어진 정보를 최대한 이용하여 그에 맞는 해석을 수행하는 것이 바람직하다.

위에서 언급한 평가를 위한 입력 정보를 정확하고 다양하게 획득하기란 쉽지 않다. 그림 2는 사용적합성 평가를 수행 시 사용자들이 느낀 어려움을 JRC - Petten에서 설문 조사한 결과이다. 설문에 응답한 사용자의 대부분은 잔류 응력 측정 및 적용, 가해진 하중과 하중 이력, 재료 물성, 비파괴검사의 신뢰성에서 가장 큰 어려움을 느낀다. 또한 응답자의 대부분은 81%는 사용적

합성평가 절차에 대한 교육 필요성에 공감했다. 이 점은 설계코드와는 달리 사용적합성평가를 실질적으로 수행하기 위해서는 상당히 높은 수준의 역학적 지식과 전문성이 필요한데서 기인한다고 판단된다.

### 3.3 사용적합성평가를 위한 보수성과 정확성

설계 코드는 안전을 위해서 보수성이 필수적으로 적용된다. 설계 코드의 보수성은 다양한 형태로 주어진다. 예로 설계 코드에 제시된 다양한 식들과 계수들에는 기본적으로 안전 계수가 내재되어 있고, 사용하는 재료 물성치에도 안전 계수가 적용되어 있다. 그리고 최종적으로 식을 설계에 적용할 때 일정 안전 계수를 적용하도록 되어 있다. 따라서 안전계수가 여러 번 중복되어서 더해지거나 곱해지므로 정확한 보수성을 정량화하기 어렵다. 예를 들어서 이러한 방식으로 가해진 ASME B&PVC 코드의 안전 계수는 약 10이라고 알려져 있다.

사용적합성 평가를 수행하는 목적 중 하나가 설비 수명연장임을 고려하면 설계 코드에 적용된 보수성을 사용적합성 평가에 사용하기는 어렵다. 따라서 사용적합성평가에서는 보수성과 정확성의 적절한 조화가 필요하며, 이를 위해 안전계수의 정량화가 필수적이다. 또한 보수성과 정확성의 적절한 조화를 위해서는 해석 시에 필요한 입력 정보의 선택이 중요하며, 일관성 있는 입력 정보 및 기법이 중요하다고 볼 수 있다. 이는 사용하는 입력정보가 일관성이 없을 경우 보수성이 과대해지거나 반대로 의도하지 않은 비보수성이 생길 수 있기 때문이다. 또한 사용적합성 평가 결과의 보수성과 조화성은 평가자의 다소 객관적인 판단에 의해 결정될 수 있으므로 평가자의 전문적 지식이 요구된다.

## 4. 결 언

본 고에서는 가동 중인 설비(압력용기 혹은 배관)에 결함이 발견될 경우 그 설비가 계속 가동될 수 있는지 혹은 설비의 잔여수명을 평가할 수 있는 사용적합성평가를 소개하였다. 최근 세계적으로 노후화된 설비가 증가하고 안전에 대한 요구가 증대함에 따라 설비의 효율적 관리의 중요성이 대두되고 설비의 수명연장이 필수적이기에 사용적합성 평가의 필요성은 향후 더욱 증대되리라 판단된다. 국내에서도 이미 다양한 산업에서 사용적합성 평가를 수행하고 있으며, 향후 국내 설비가 노후화에 따라 그 중요성이 더욱 증대될 것이라 예상된다. 이를 위해 국내 다양한 산업이 사용적합성 평가분야의 협의체를 구성하여 축적된 경험을 공유하고 기술을 공유하며, 전문가를 양성하여 사용적합성 평가 적용에 의한 파급효과를 극대화하는 것이 필요하다고 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. ASME, Rule for in-service inspection of nuclear power plant components - ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI (1996)
2. British Energy, R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, Revision 4 (1998).
3. British Energy, R5: Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures, Issue 2 (1998)
4. SINTAP, Final Procedure: SINTAP (Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry), Brite-Euram Project (1999), BE95-1426
5. FITNET, European fitness-for-service network. Contract no. GIRT-CT-2001-05071, www.eurofitnet.org.
6. API, API RP579 - Recommended Practice for Fitness-For-Service (2000), American Petroleum Institute



- 김운재
- 1961년생
- 고려대학교 기계공학과
- 재료 및 파괴역학
- e-mail : kimy0308@korea.ac.kr



- 이국희
- 1980년생
- 고려대학교 기계공학과 대학원
- 구조 건전성 평가
- e-mail : oasis@korea.ac.kr



- 송태광
- 1979년생
- 고려대학교 기계공학과 대학원
- 구조 건전성 평가
- e-mail : songdalgu@korea.ac.kr