

## 가압경수로형 원전의 가동중검사 적용 기술 기준

홍 순 신  
한국원자력연구소

### Applicable Technical Criteria for Inservice Inspection of Light-Water Cooled Plants

Soon-Shin Hong  
Korea Atomic Energy Research Institute

요 약 현재 국내의 原子力 發電所는 경수로형 원자로(PWR)가 대부분이며, PWR의 경우 ASME Sec. XI의 요건에 따라 稼動前中 檢査(preservice and inservice inspection)을 핵연료 교체 및 정기 보수 기간에 수행하고 있다. 현재 83년 및 86년 규격들이 검사에 적용되고 있으며 조만간 89년 規格이 適用될 시점이다. 따라서 원전 주요 부품에 대한 ASME규격의 檢査 要件의 變化 過程을 살펴 보고 검사 강화 및 완화 내용을 검토하였다. 규격은 71년부터 89년까지를 대상으로 編輯年度基準으로 검토하였으며, 부록판의 내용은 제외하였다.

#### 1. 序 言

미국에서는 1800년대에 보일러의 安全 規格의 작성이 시도되어 증기선 검사법규가 최초로 발행되었으며, 1900년을 전후하여 보일러의 폭발사고와 발생 건수 및 사상자의 수가 계속적으로 증가추세에 있어 강력한 규격이 요구되고 있었다.

1900년대 초에 보일러 안전에 관한 최초의 법률을 제정하여, 미국내 각 주마다 안전법을 작성해짐 되었다. 이렇게 각주의 법규는 제품의 均一성과 互換성을 얻기가 어려워 통일 규격의 필요성을 갖게 되고 이것이 1915년 최초의 ASME Code를 정식으로 발행하게 되는 계기가 되었다. 이것이 1954년

원자력 시대의 도래와 함께 Section III의 발행, Section VIII의 개정등이 이뤄지고 1970년에는 원자력 壓力容器에 대한 규격의 엄격화와 검사의 特殊性에 비추어 규격화가 요구되면서 Section XI "Inservice Inspection of Nuclear Reactor Coolant System"을 발행하였다.

ASME 규격은 총 11개 Section으로 구분되며 원자력발전소의 비파괴검사와 관련하여 Section III, V, IX 및 XI 등이 있다. 이 중 특히 "原子力 發電所 部品の 稼動中 檢査에 관한 규칙"인 Section XI의 변화과정에 관하여 대략 15여년간의 내용을 위주로 원자력발전소 重要 壓力 維持 部品에 대한 기본적인 주요 변경 내용을 고찰하여 원전 부품의 비파괴

검사 추이를 살펴보기로 한다. 본 보고서에서는 一次冷却水가 흐르는 계통인 Class 1 壓力維持 部品을 골자로 檢討하고 추후 Class 2 압력 유지부품의 검사 기준을 검토하도록 한다.

2. 本 論

美國機械學會(ASME)규격 Section XI은 Section III에 따라 제조한 기기의 가동중의 檢査 및 試驗에 관한 규격으로 Division 1,2,3로 나누어 경수로형(PWR)원전기기, 개스로형(GCR)원전 기기와 액체 금속로형(LMCR)원전 기기로 구분 적용되며, 또한 subsection으로 나누어져 각 부품과 Class 마다 별도의 subsection을 적용하겠끔 되어 있다. 특히 수록할 내용은 국내에 중수로형인 CANDU형 원전을 제외 하고는 모두 경수로형 원자력발전소를 가동 및 건설하고 있으므로 Div.1인 경수로형 원전 기기의 가동중 검사 규격에 관한 특기할 만한 변화 내용 및 중요 압력유지 부품중 IWB의 검사요건을 편집년도(edition year)기준으로 검토하도록 한다. 원자력 발전소의 중요 부품의 비파괴검사 관련 요건은 Table 1의 subsection으로 구분하여 각 安全 等級別 검사 요건, 검사결과의 評價基準 및 설비의 보수요건등이 각기 다르게 적용된다.

Table 1. ASME Code section XI division 1의 구성

Subsection	제 목 및 내 용
IWA	일반 요건
IWB	Class 1 부품의 요건
IWC	Class 2 부품의 요건
IWD	Class 3 부품의 요건
IWE	Class MC,CC의 요건
IWF	Class 1,2,3 및 MC부품의 지지 구조물의 요건
IWL	Class CC 콘크리트 부품의 요건
IWP	원전 펌프의 가동중 시험
IWV	원전 밸브의 가동중 시험
Appendices	Mandatory
	Nonmandatory

2.1. Class1 部品の 檢査要件

檢査는 建設이 끝난 후 초기 運轉前에 수행되는 가동전 검사와 가동중의 핵연료 교체 및 정기 보수 기간에 수행되는 가동중검사로 나누는데 특히 Class 1 부품의 압력용기와 배관부는 가동전검사는 압력이 유지되는 전 용접부 100%를 IWB-1220의 검사 제외 부품을 빼고는 檢査對象으로 삼으며 가동중 검사시에 배관 용접부는 IWB-2500의 檢査 選定 方法에 의거하여 전 용접부의 25% 정도가 선정되어 검사 수행된다. 특히 Class 1 부품으로 구분되는 범위는 10 CFR 50, 50.55a, 50.2(V)에 근거한다.

2.1.1. 檢査 計劃(inspection program)

Class 1 부품인 一次 冷却水系統의 검사계획은 Table IWB-2411-1(inspection program A)와 Table IWB-2412-1(inspection program B)에 의거하여 가동중 검사 계획을 세우게 되며, 後續 檢査 週期에서는 1차 10년 주기 가동중검사 계획에서 선정된 검사대상이 계속 검사 수행되며, 검사 결과 許容基準 이상의 결함이 발생시 추가 확대 검사가 수행되게 된다. 현재 국내 PWR형 원자력 발전소의 검사계획은 Table 2와 같은 inspection program B를 따르고 있다.

Table 2. Inspection program B(Table IWB-2412-1)

검사주기	Inspection Period(년)	최소 검사 완료량(%)	최대 검사 완료량(%)
1 차	3	16	34
	7	50	67
	10	100	100
후속주기 (2,3,4차)	3	16	34
	7	50	67
	10	100	100

2.1.2. 檢査 對象

검사 및 압력시험 대상이 되는 것은 Table 3과 같이 각 압력유지 부품의 용접부와 기타 부위가 되며, 본 검사 및 시험 대상들이 設計의 變化 즉 설계기술의 발전, 기준의 변화에 따라 그리고 평가기술, 중요도등에 따라 檢査 技術 및 要件의 변화가 계속되어 왔다.

Table 3. Class 1범위의 검사대상 부품

검사 범주	검사 부위	평가 기준
B-A	원자로의 압력유지 용접부	IWB-3510
B-B	원자로 이외의 압력용기의 압력유지 용접부	"
B-D	압력용기의 full penetration 노즐 용접부	IWB-3512
B-E	압력용기의 압력유지 partial penetration 용접부	IWB-3522
B-G-1,2	직경 2인치 이상, 이하 압력 유지 볼팅	IWB-3515
B-H, B-K-1	압력 용기, 배관, 펌프, 밸브에 대한 integral attachment	IWB-3516
B-FJ	배관의 압력유지 용접부	IWB-3514
B-L-1, B-M-1	펌프 케이싱 및 밸브 몸체의 압력유지 용접부	IWB-3518
B-L-2, B-M-2	펌프 케이싱 및 밸브 몸체의 내벽	IWB-3518
B-N-1,2,3	원자로 내벽 및 내부 구조물	IWB-3520
B-O	CRD의 압력유지 용접부	IWB-3523
B-P	모든 압력유지 구성품	IWB-3522
B-Q	증기발생기 전열관	IWB-3521

Table 3과 같은 部品들이 檢査對象이 되어 왔으며, 이중 검사기준, 정도에 따라 주요대상 및 특기 사항들을 발췌하여 변화 추이를 살펴보기로 한다. 原電 部品에 대한 비파괴검사 요건을 부분별로 구분하여 상세하게 기록하기 시작한 것은 1974년판 규격에서 부터 정리되어 발간되었다.

원자력발전소의 비파괴검사는 거의 대부분의 검사 방법이 사용되고 있는데, 건설시의 방사선투과시험, 가동전중 검사는 體積檢査와 表面檢査로 나누는데, 대부분의 압력 유지 용접부는 그 요건에 따라 표면 및 체적검사를 수행하고, 각 부품의 지지구조물은 육안검사(VT)를, 증기발생기 전열관은 체적검사인 와전류탐상검사를 수행한다. 여기서 체적검사란 초음파탐상검사(UT), 와전류탐상검사(ECT), 방사선투과시험(RT)이고, 표면검사는 자분탐상(MT)과 침투탐상(PT)으로 검사대상 부품의 재질에 따라 결정한다. 稼動前.中 檢査는 체적검사의 검사 방법을 유럽의 規格과 달리 접근성이 유리한 超音波探傷檢査를 選擇하여 수행하고 있다.

1) 原子爐(Reactor, B-A)

74년도 규격에서는 원자로의 core영역에서의 원주 및 축방향 용접부만을 B-A category에 넣어 체적

검사를 하도록 하고 나머지 head 부위의 자오선 및 원주 방향과 core 영역외의 원주 및 축방향 용접부, 원자로 이외의 加壓器, 蒸氣發生器, 熱交換器의 원주 및 축방향 용접부는 B-B category로서 구분하였다. 77년 규격에서 원자로는 B-A category로, 원자로 이외의 압력용기는 B-B category로 재구분하였다.

원자로는 내부에서 접근하여 초음파검사를 실시하므로 内部 構造物을 모두 해체하여 들어내야만 접근이 가능하다. 따라서 본 규격은 특별한 문제가 없는 한 내부 구조물(core support structure)을 해체하여 들어내지 않고 단지 비파괴검사를 위해 들어내므로 이에 대한 經濟性을 고려하여 그 시기를 조절할 수 있다. 검사 정도 및 검사량을 10년 주기 중 配分 適用하는 내용들을 상세히 언급한 것이 80년도 규격이고 10년 주기를 3차 기간으로 나누어 1차와 3차에 나누어 검사할 수 있도록 하였다. 또한 beltline 영역 즉 핵연료 영향권내의 원자로벽의 용접부가 제 2,3,4 주기에서 한 용접부만 선택 검사하도록 86년까지 적용되었으나 89년 규격부터는 전 용접부가 차기 10년 주기에 계속 검사 대상이 되도록 강화되었다. Beltline 영역내의 용접 보수영역에 대하여 첫번째 10년 주기에는 모든 보수 범위가 검사대상이고 후속 검사주기에서는 보수범위중 한

곳만이 검사대상이었으나 89년부터 전보수 범위가 검사 범위가 되도록 검사가 강화되었으며 검사의 延期는 각 週期の 끝까지 接近性を 고려하여 허용하고 있다.

원자로의 용기와 플랜지, 헤드와 플랜지 용접부를 71년 규격에서 B-C category로 하였으나 후에 B-A category로 예측하였으며, B-C category는 삭제됐다.

### 2) 原子爐 以外の 壓力容器(B-B)

ASME 규격에서는 일차 계통의 B-B category에 해당하는 압력용기는 가압기(pressurizer), 증기발생기(steam generator, primary side), 열교환기(heat exchanger, primary side)가 이에 해당된다. 역시 헤드 부위와, shell 부위의 子午線, 圓周 및 軸方向의 압력유지 용접부가 검사대상으로 된다. 74년 규격에서는 앞서 언급한 바와 같이 원자로의 core영역외의 shell, head 부위의 용접부를 B-B로 구분하였으나 77년에 B-A로 구분하였다. 加壓器의 경우 shell과 head 용접부는 모두 검사대상이며 80년 규격까지는 head 용접부의 원주 및 자오선 방향 용접부로 한 곳만 검사토록 하였으나 83년부터는 전 용접부가 검사대상이 되며 대신에 축방향 및 자오선 방향의 용접부는 차기 10년주기에서는 head당 한개의 용접부만이 선택 검사토록 규정하고 있다. 증기발생기 및 열교환기 경우는 一次側의 tube sheet와 혹은 shell 용접부는 원주 방향 용접부 100%가 검사 대상이며, 축방향 용접부 1ft만이 검사 대상으로 이는 77년에 검사 결정내용이 변경되지 않았다.

### 3) 압력용기의 Full Penetration 노즐 용접부 (B-D)

원자로, 가압기, 증기발생기 및 열교환기의 노즐 용접부는 100% 검사를 수행토록 하며 원자로와 같이 내벽에서의 검사는 超音波빔의 접촉부위에 따라 검사 시기를 조정 할 수 있도록 배려하고 있다. 특히 타 검사에서는 없는 노즐의 内部 曲率部(inner radius section)의 초음파검사를 하는 것이 특징이라 하겠다. 노즐부 검사는 71년 규격이래 변경사항이 없다. 단 manway나 hand hole 용접부는 검사에서 제외되는 내용이 80년 규격에서부터 명백히 수록되어 있다. 원자로의 노즐 용접부는 검사 주기 끝까지

연장 가능토록 허용하고 있으나 나머지 압력용기는 허용하지 않는다.

### 4) 異種金屬間 溶接部(B-F)

4인치 이상과 미만의 공칭 직경을 갖는 이종금속간 용접부에 대한 구분을 80년 규격까지는 Table (IWB-2500-1)에 수록하지 않고, Fig. IWB-2500-8에 수록하였으나 이를 83년부터 Table에 명기하여 혼동을 피하고 또한 socket 異種金屬間 용접부도 명확히 구분하였다. 直徑 4인치 이상의 이종금속간 용접부는 체적 및 표면검사, 가동전, 중 검사에서는 초음파탐상과 液體浸透探傷을 주로 수행한다. 4인치 미만은 표면검사만 수행토록 한다. 이종금속간 용접부는 原電 壽命期間동안 10년 주기로 전 용접부가 검사대상이 될만큼 주요한 부위이다. 그리고 구분은 원자로, 가압기, 열교환기, 증기발생기 및 배관부의 이종금속부가 해당된다.

### 5) 직경 2인치 이상의 압력유지 볼팅(B-G-1)

74년 규격에서 부터 B-G-1 category로 원자로, 가압기, 증기발생기, 열교환기, 배관 및 펌프 등의 압력 유지 볼팅이 검사대상이 되며, 이중 원자로의 stud 경우 해체시는 체적 및 표면검사로 초음파탐상 및 형광자분탐상을 수행하고 있다. 또한 원자로의 closure head nut는 86년에는 표면검사로 구분탐상이 수행되어 왔으나 89년부터는 육안검사로 완화되었다. 83년 규격에서부터 플랜지 표면은 해체시에 주위 1인치가 검사대상이 되었다. B-G-2 category 즉 2인치 미만의 볼팅은 육안검사만으로 수행한다.

### 6) 壓力維持 配管溶接部(B-F, J)

71년 규격은 直徑이 4인치를 초과하는 배관 용접부는 육안 및 체적검사를, 4인치 이하의 육안 및 표면검사를 요구하였다. 74년 규격에는 원주 및 축방향 용접부는 체적 및 표면검사를 4인치 미만은 표면검사를 요구하고 있으며, 가지이음부는 모두 표면검사로 변경되어 완화되는 듯 하였으나 다시 80년 규격부터는 직경이 2인치 초과되는 배관의 용접부는 體積 및 表面檢査를, 2인치 이하의 표면검사를 요구하였다. 또다시 83년에 4인치 이상은 표면 및

체적검사를 4인치 미만은 표면검사를 요구하고 있으나 실제로는 원전의 공칭 배관직경은 2, 2.5, 3, 4 인치 순으로 제작 사용되므로 2인치 초과란 결국 2.5, 3인치의 직경을 갖는 가지 이음부가 해당되는가 안되는가를 결정하는 것으로 83년부터 3인치 이하의 가지 이음부의 체적검사는 곡률, 두께를 고려할 때 검사 효율성과 실제 필요성이 적어 삭제된 것으로 사료된다. 일차계통의 배관 용접부 검사는 稼動前 檢查시는 IWB-1200의 검사 除外項目을 빼고는 100% 검사를 수행하며 가동중검사는 Table IWB-25 00-1(note 1)에 의거하여 원주방향 용접부 25% 이상이 검사대상으로 선정된다. 선정 방법은 각 배관, 용기의 끝부분 용접부, 배관의 應力 레벨이 어떤 제한값 이상인 용접부, 異種金屬間 溶接部등이 대상이고, 추가로 全 圓周方向 용접부의 25%가 임의 선택으로 추가선정된다. 1차 주기에 검사하기로 선정된 용접부는 2, 3, 4차 주기에서 계속 선정되며 軸方向 溶接部는 배관 직경이나 원주용접부와 만나는 지점에서 12인치 이내중 작은 쪽을 택한다.

7) 배관, 밸브, 펌프의 지지구조물(B-K-2)

각 검사 주기마다 전 지지구조물을 검사하며 snubber, shock absorber 및 spring hanger의 setting 값을 확인하는 것으로 77년 규격까지 이 요건에 따랐으나 80년부터 삭제되고 원전 지지 구조물의 육안검사는 IWF를 따를 것을 요구하고 있으며, 특히 방진기(snubber)에 대하여 89년판에서 ASME/ANSI OM-1987, part 4의 요건을 따를 것을 요구하여 대폭 강화되었다.

8) 原子爐 內壁檢査 및 内部 構造物 檢査(B-N-1, 2,3)

내벽검사(B-N-1)는 첫번째 핵연료 장전시 검사를 수행하고 매 3년마다 접근 가능 부위에 대해 검사 수행하며, B-N-2는 비등수형 원자로(BWR)의 내부검사이고 B-N-3은 가압경수로형 원자로(PWR)의 내부 및 core 지지 구조물의 육안검사를 수행토록 요구하며 77년 규격부터 要件化된 내용이다. 83년 규격부터 beltline 영역내와 밖의 integral attachment 육안검사가 추가되었다.

9) 全 壓力維持部品の 漏泄 및 水壓試驗(B-P)

원자로, 가압기등 압력용기와 배관, 펌프 및 밸브에 대하여 系統漏泄시험과 수압시험을 요구하는 것으로, 77년 규격에서는 IWB-1220에 의거 검사 제외 항목이 시험 대상이었으나 80년부터는 전 압력유지 부품이 계통 누설시험 및 수압시험을 하도록 강화되었다.

10) 蒸氣 發生器 傳熱管(B-Q)

77년 규격에서 첫 검사 주기에서 직선튜브와 U-튜브의 체적검사 즉 와류탐상검사를 전 튜브의 3%를 검사하고, 두번째 검사 주기부터는 1.5%를 선택 검사토록 요구하였으나 이 전열관의 檢査要件, 方法 및 程度를 80년 규격에서는 발전소 기술시방서에 의거 결정토록 하였다.

2.1.3. 표면 및 체적검사 범위

용접부의 체적검사의 검사 체적은 과거 77년 이전에는 용접부와 인접모재 1T가 포함되도록 하다가 다시 1/2T로 검사체적이 감소되었으나, 압력용기 경우 77년 규격 이후에는 Cass 1과 Cass 2를 구분하여 1/2T와 1/2인치의 모재로 되고, 노즐 용접부는 1/4인치 母材가 포함되도록 하였다. 配管은 용접부와 모재 1/2T가 요구되었으나 77년 후에는 용접부와 1/4인치 모재로써 용접부 root부 1/3T가 검사 관심체적으로 줄어 들었다.

Table 3. Class 1 용접부의 검사 체적 범위 (Examination volume)

구분	용접	
	압력 용기	배 관
원주, 축방 향 및 노즐	Weld + 1/2T 모재 (Fig. 1,2 참조)	Weld + 1/4 in 모재로 1/3T (Fig. 3참조)
전 용 접 형 태	Weld + 1/2T 모재	77년 부터 현재 75년 여름 혹은 1인치중 부록전 작은 것

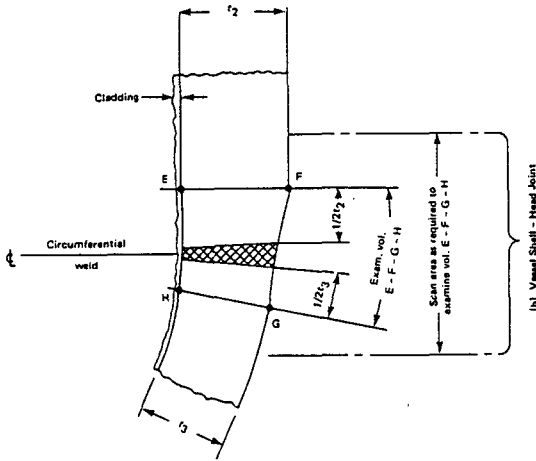


Fig. 1. 압력용기 용접부 검사 체적

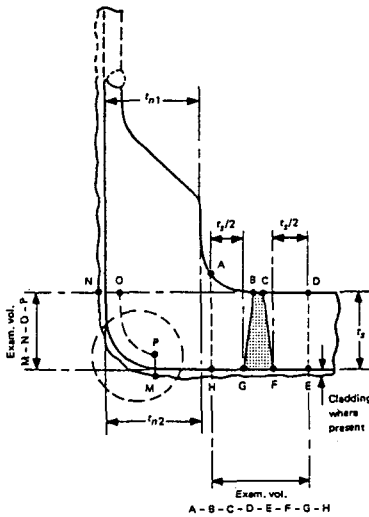


Fig. 2. 압력용기 노즐 용접부 검사 체적

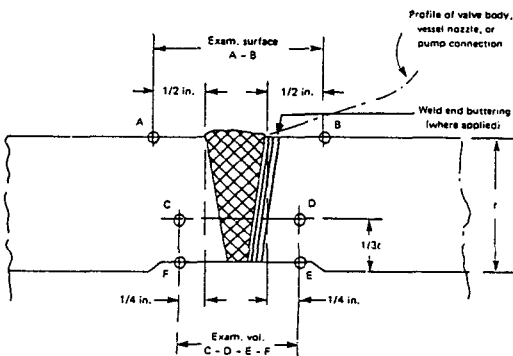


Fig. 3. 배관 용접부 검사 체적

2.2. ASME 규격의 附錄 지침

ASME 규격의 부록에서 초음파탐상에 언급한 내용을 살펴보면 Table 4에서 보는 바와 같이 86년에 볼트 및 스테드 검사에 대한 검사자 자격요원을 수록한 내용이 포함되고 89년도에 APP.I에서 일반 초음파탐상, APP.VII에서 초음파검사자의 資格要件, 89년 부록판 APP.VIII에서 초음파검사자의 기량 검증요건을 발행하여 절대적으로 따르도록 요건을 강화하였다. 93년 현재 美國의 聯邦規則인 10CFR50에서는 89년 규격까지를 承認하고 있으며 따라서 국내에 적용하고 있는 규격도 89년 규격을 적용할 시점에 와 있으나 초음파검사를 위한 補正 試驗片 제작의 문제점과 본 규격의 요건을 따를만큼 충분한 기술확보가 되어 있지 않으므로 조속히 해결할 문제이다.

Table 4. ASME 규격의 부록요건

부록	내용	비고
I	일반 초음파탐상	77년 삭제 89년 부활
II	가동중검사 보고	
III	배관 초음파탐상	86년 탄소강 및 스테인레스 강 추가
IV	비철 자성체인 증기발생기 및 열교환기 튜브 와전류탐상	
V	보일러 및 압력용기 위원회 기술질문준비	86년 추가
VI	볼트 및 스테드 초음파검사	86년 추가
VII	초음파검사를 위한 검사자 자격요건	89년 추가
VIII	초음파검사 시스템의 기량 검증요건	89년부록판 추가

3. 結 言

원자력발전소의 主要部品, 즉 高溫, 高壓과 放射性物質을 수반하는 一次 冷却水가 흐르는 압력용기 및 배관의 압력유지 용접부에 대한 검사요건을 ASME 규격의 編輯 年度 기준으로 그 변화과정을 살펴 보았다. 대체적으로 77년도의 검사요건이 주요 부품에 대해 그대로 반영되고 있으며 단지 배관의

가지 이음부(branch connection)가 공칭 직경크기에 따라 變更事項이 발생되었다. 국내 원전도 현재까지는 83년 및 86년 규격을 적용하고 있으나 94년부터는 89년 규격을 적용할 원자력발전소가 발생하며, 추후 건설되는 발전소는 89년이후의 규격이 적용예정인 바, 檢査 技術과 要件強化 및 추가사항에 대한 적절한 대처가 절실히 요구되는 시점이다.

#### 참 고 문 헌

- 1) ASME B & PV Code Sec.XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components (1971,1974,1977,1980,1983,1986,1989년 Edition 및 1989년 부록판)
- 2) ASME B & PV Code Sec. V, Nondestructive Examination(1974,1977,1980,1983,1986,1989년판)
- 3) 김남하, "ASME Code와 그 관련 사항" pp.13-15, 1981