

LBB 개념의 적용과 규제

원자로 압력 경계
LBB 전문가 회의
95. 10. 9~10.11
프랑스 리옹



이 정 배
한국원자력안전기술원
기계설비그룹장

요약

자력발전소 배관 설계에 파 단전 누설(leak before break, LBB)이라는 새로운 설계 개념이 도입됨에 따라 각국의 LBB 평가 기술 현황·적용 사례·규제 동향의 파악과 기술 정보의 상호 교류, 그리고 기술 견해의 수렴을 위한 국제적인 세미나 또는 전문가 회의가 개최되고 있다.

LBB 국제 세미나는 지난 83년부터 89년까지 매 2년마다 세계 원자력계의 관심 속에서 대만·일본·미국 등지에서 개최된 바 있다.

이 과정에서 국제 컨소시엄 형태의 배관 건전성 국제 공동 연구(International Piping Integrity Research Group, IPIRG)가 US NRC 주도하에 추진되었으며, LBB 세미나는 IPIRG 참여국들의 적극적인 활동에 힘입어 세계 원자력계의 이목이 집중되었다.

그 이후로는 IPIRG-2 프로그램의

일환으로 추진되어 오다가 IPIRG-2 기술 자문단(Technical Advisory Group, TAG) 회의의 결정에 따라 95년도에 다시 국제적 규모의 공개적인 전문가 회의의 형태로 개최되었다.

회의 개요

원자로 압력 경계 LBB 전문가 회의(LBB '95)는 IPIRG-2 TAG 회의에서 프랑스가 유치·개최하기로 결정됨에 따라 EDF, Framatome, CEA, EC-WGCS, NE, IAEA, OECD-NEA, US NRC가 공동 후원하고 SFEN(French Nuclear Energy Society)이 조직하여 지난해 10월 9일부터 10월 11일까지 프랑스의 리옹에서 열렸다.

LBB 전문가 회의에 이어서 제7차 IPIRG-2 TAG 회의도 함께 열렸다.

이번 LBB '95에는 세계 21개국의 원자력 규제 기관·산업체·연구소·

학계 등에서 온 관련 전문가 170여 명이 참가하였으며, 필자는 IPIRG-2 TAG 멤버로서 이 전문가 회의의 준비 단계에서부터 참여하게 되었다.

이 회의의 목적은 LBB에 대한 기술 현황을 발표하고 각국에서 개발된 방법·경험·기준을 비교하는 데 있었다.

특히 국제 원자력계에서의 LBB 적용 현황과 규제 정책이 중점적으로 다루어졌으며, LBB 개념과 그 적용에 대한 단계적 검증을 위한 연구 개발, LBB 방법의 한계에 대한 평가, 그리고 관련 기준의 개선 또한 관심 사항이었다.

이번 LBB '95에서는 각 나라에서의 LBB 적용 현황 및 사례, LBB 방법론상의 기술적 문제, LBB 적용에 따른 보완적 요건, LBB 평가와 여유도 등 4개 범주의 세션으로 구분하여 주제 발표 및 토의가 진행되었으며, 포스터 세션을 병행함으로써 관련된 많은 논문이 발표될 수 있게 하였다.

또 LBB 방법론상의 기술적 문제를 다루는 세션에서는 「LBB 적용이 구조적 건전성 및 안전성에 미치는 결과」라는 제목으로 패널 토의가 있었다.

LBB '95에 이어서 열린 제7차 IPIRG-2 TAG 회의는 15개 참여 회원국들의 TAG 대표들이 Battelle에 하청하여 수행된 연구 내용과 예산 집행 내역 등을 검토하고 방향을 제시하는 회의이다.

이 회의에서는 그 동안 IPIRG-1에서 IPIRG-2까지 추진되어온 경위와 지금까지 달성된 연구 결과를 되돌아보았다.

또 지난 제6차 TAG 회의 이후 추진된 IPIRG-2 과제에의 연구 수행 결과와 예산 사용 내역이 검토되었으며, 향후 Battelle이 해야 할 잔여 연구 업무에 대한 수행 계획과 연구 자금 투입 방안도 토의되었다.

아울러 IPIRG-2 후속 프로그램의 추진에 대해서도 논의되었다.

본고에서는 전문가 회의에서 발표·토의된 내용에 있어서 LBB와 관련한 어떤 기술적인 내용을 다루기보다는, 각 나라에서의 LBB 적용 현황과 규제 동향에 관련된 내용을 요약하여 소개하고자 한다.

주요 내용

1. 안전성과 LBB 기술의 역할

LBB는 이미 미국을 포함한 여러 나라에서 원전 배관 계통의 설계 및 운전에서 있어서 실제 적용 단계에 와 있고, 이미 규제 법규 또는 규제 관행에 반영하고 있는 나라도 있다.

이 개념을 기존의 원전에 적용하려고 하는 것은 경비 절감과 함께 안전성이 향상되는 이종의 이득 효과를 기대하고 있기 때문이다.

이 세션에서는 원자력발전소 설계에 있어서 LBB라는 새로운 개념의 도입에 따른 규제 기준에의 영향, 설

계의 영향, 경제적 효과, 안전 여유도, 관련 기술 발전 등 원전의 안전성에 관련된 다양한 발표가 있었다.

특히 미국에서의 LBB 관련 규제 요건의 변화와 이에 대한 벨기에의 시각, 독일에서의 LBB 개념과 신규 원전에의 적용 요건, 그리고 옛 소련의 WWER 및 RVMK 원자로에 있어서의 LBB 평가에 관한 IAEA의 검토 활동 등이 발표되었는데, 미국에서는 이미 규제 입장이 정리되어 관련 법규인 GDC-4가 개정되었고, 독일도 LBB와 유사한 개념인 파단 지점 배관 개념에 대한 독일 고유의 요건이 정립되어 있다.

벨기에의 규제 입장은 미국의 경우와 달리 GDC-4의 개정이 심층 방어 관점에서 안전 여유 감소의 소지가 있으므로 설계 기준에서 LOCA 하중의 배치는 불가하며, LBB 해석을 통해 배관 휨 구속 장치의 제거와 가상 LOCA 하중에 대한 기기 지지물 설계 하중의 완화는 고려할 수 있다는 입장을 취하고 있다.

반면에 비현실적으로 보수적인 1 msec의 배관 파단 진행 시간 대신에 더 실제에 가까운 값을 사용하도록 권고하고 있다.

2. 기존 원전의 LBB 적용 현황

운전중인 발전소에 대한 LBB 평가는 배관 휨 구속 장치나 제트 분출 방벽 등을 제거하여 가동중 검사나 유지 보수시의 접근성을 좋게 하거나,

〈표 1〉 운전중인 미국 원전에서 LBB 적용이 승인된 배관 계통

(95.8 현재)	
LBB가 적용된 배관 계통	승인된 발전소의 수
Reactor Coolant System-Primary Loop Piping	76
Pressurizer Surge Lines	12
Safety Injection Accumulator Lines	10
Residual Heat Removal Lines	6
Safety Injection Lines	1
Reactor Coolant Loop Bypass Lines	3

발전소의 가열 또는 냉각시에 열팽창 차이로 인한 배관과 배관 휨 구속 장치의 접촉 문제를 해소하기 위하여 수행된다.

또 증기 발생기의 교체 후 배관 휨 구속 장치를 다시 설치하지 않기 위한 목적으로 수행된 경우도 있다.

이러한 시도의 이유는 시설 투자 비용의 절감은 물론, 발전소 잔여 수명 동안의 종합적인 기기 유지 보수 비용 면에서 상당한 절감이 기대되고, 또 개인 피폭을 감소시킬 수 있는 효과를 얻을 수 있기 때문이다.

US NRC는 110개 가압 경수로 원전의 1차 냉각재 계통 배관 또는 그 밖의 고에너지 배관에 대하여 LBB를 적용하도록 승인함으로써, 배관 휨 구속 장치 및 제트 분출 방호벽의 제거 등 운전 안전성 및 접근성을 향상시킬 수 있게 하였다(표 1).

가압기 밀림관의 경우는 열성층 문제 때문에 배관 휨 구속 장치들 중의 일부를 제거할 필요가 있어서 LBB 평가가 수행되었다.

가압기 밀림관의 LBB 평가에서는

요구 기준을 겨우만족시키는 것으로 나타났다는데, 그래도 12개 원전에 대해서는 배관 휨 구속 장치들 중의 일부를 제거할 수 있도록 승인되었다.

그 밖에도 LBB 적용에 근거하여 LOCA 압력 하중을 배제함으로써 원자로 압력 용기 annulus에 permanent neutron shield/pool seal의 설치를 허용하였다.

BWR의 경우에 대해서는 입계 응력 부식 균열(IGSCC) 문제에 대한 우려 때문에 LBB의 적용이 승인되지 않은 것으로 발표되었다.

벨기에의 경우, Doel 3와 Tihange 2에 대해 원자로 냉각재 펌프의 스너버를 제거하기 위해서, 또 Doel 3에서는 증기 발생기의 교체 후 배관 휨 구속 장치를 다시 설치하지 않기 위하여 LBB 평가가 수행되었다.

Doel 3와 Tihange 2는 3-loop 900MWe형 원자로이다.

이들 원자로에는 냉각재 펌프 1대당 3개씩의 대용량 유압식 스너버가 부착되어 있었는데, 보수 유지 문제로 이들을 교체하는 과정에서의 예비 평가 결과 각 펌프마다 1개씩의 스너버만 있어도 되고, LBB 평가를 수행하여 원자로 냉각재 배관 계통에서 스너버를 각 호기당 9개에서 3개씩으로

줄일 수 있음이 확인되었다.

이 외에도 Tihange 1의 1차 냉각재 배관에 대해서도 LBB 평가가 수행되었으며, Doel 4에 대해서도 LBB 평가가 진행되고 있는 것으로 발표되었다.

우리 나라에서도 이미 영광 3·4호기부터 1차 냉각재 계통 배관 및 가압기 밀림관, 그리고 잔열 제거 계통 및 안전 주입 배관들에 대하여 세계 최초로 설계 단계에서 LBB 개념이 적용되었는데, 이번 전문가 회의에서는 LBB 평가 과정에서 겪었던 밀림관의 노즐-배관 연결부에서의 균열 열림 면적 평가 문제에 대한 발표가 있었다.

그 밖에도 벨기에·프랑스·독일의 가압 경수형 원전에서의 LBB 적용 현황, CANDU형 원전에 있어서의 LBB, R-6 LBB 평가 방법의 적용 사례, 프랑스 고속 증식로의 적용 사례, IAEA의 LBB 관련 프로그램 등에 대한 발표가 있었다.

프랑스에서는 고속 증식로 이외의 가압 경수형 원전에 대해서는 LBB 개념의 실제 적용을 제한하고 있다.

고속 증식로의 경우에는 Super Phenix(SPX)의 main vessel(MV) 및 배관에 대하여 수행되었는데, 이는 단지 노심 지지 기능에 있어서 위해가 없음을 심층 방어 개념 차원에서 입증하고 가동중 검사 프로그램의 수립을 돕기 위하여 수행되었다.

스웨덴에서는 스웨덴형 BWR 설계에 있어서의 LBB 적용 필요성을 강

조하였다.

특히 배관 파단의 동적 효과를 방호해 줄 장치가 없는 초창기 BWR 원전에 대해서 LBB 평가가 수행되는 것이 중요하다고 한다.

CANDU형 원전에 대한 LBB 적용 사례로서 Darlington 원전에 제한적으로 적용한 사례가 소개되었는데,

Darlington 원전에서의 LBB는 배관 휨 구속 장치의 설치가 불가능한 경우에 한해서, 격납 경계나 안전 정지 계통의 고장을 초래하지 않고 노심 양쪽의 비상 냉각재 주입에 지장을 주지 않을 경우에만 적용되었다.

LBB 평가에 관한 방법과 기준들은 각 나라별 정책에 의존하게 되는데,

국제적으로 단일 기준화하기 위한 노력이 계속되고 있다.

그 노력의 일환으로 일본 가압 경수로의 1차 계통 배관에 대하여 US NRC의 방법에 따라 수행된 LBB 평가 사례가 발표되었다.

이 사례에서는 일본의 LBB 기준에 따른 평가도 병행되었으며, US NRC의 평가 방법과 일본 방법의 차이를 비교하여 보여주고 있다 <표 2>.

(표 2) 미국과 일본의 LBB 평가 방법 비교

U.S. Approach	Japanese Approach
<p>a) Postulated through-wall crack</p> <p>Leakage Crack Size Factor of 10 margin with respect to leak detection capability.</p> <p>Leakage crack size is determined using plant normal operating loads.</p> <p>Leakage Crack Angle : 11.70 deg.</p>	<p>a) Postulated through-wall crack</p> <p>Leakage Crack Size Factor of 5 margin with respect to leak detection capability.</p> <p>Leakage crack size is determined using 0.5 Sm stress conservatively.</p> <p>Leakage Crack Angle : 25.6 deg.</p> <p>Also postulated through-wall crack size of 5T. Crack Angle : 56.6 deg.</p> <p>Leakage crack size is the larger of the two. For the primary loop the latter criterion governs.</p>
<p>b) Crack Stability Evaluation</p> <p>Demonstrate a margin of a factor of 2 between the leakage crack size and the critical crack size using J-T approach and the limit load approach.</p> <p>J-T Approach :</p> <p>Incorporating the effects of thermal aging, calculate J-T applied value for 23.40 deg. through-wall crack and show them to be lower than the material toughness allowables.</p> <p>Limit Load Approach :</p> <p>Critical Crack Size is 115.97 deg.</p> <p>A factor of 2 between the leakage crack size and the critical crack size is demonstrated by both the approaches.</p>	<p>b) Crack Stability Evaluation</p> <p>The postulated crack 56.6 deg. in angle is shown stable by comparing the allowable bending stress with the applied bending stress. The limit load approach is used to demonstrate the crack stability.</p>

3. 차세대 원자로의 LBB 적용

이미 앞에서 언급된 바와 같이 LBB의 적용은 배관 휨 구속 장치나 체트 분출 방보벽 등을 제거하여 시설 투자 비용을 절감할 수 있으며, 배관 루프들과 토건 구조물간의 상호 간섭을 최소화시킴으로써 발전소의 가열 또는 냉각시의 열팽창 차이로 인한 배관과 배관 휨 구속 장치의 접촉 문제를 해소하여 안전성을 향상시킬 수 있다.

또 가동중 검사나 유지 보수를 위한 접근성이 좋아져서 발전소 수명 기간 동안의 종합적인 기기 유지 보수 비용이 절감됨은 물론, 개인 피폭을 감소시킬 수 있는 부수적인 효과도 있다.

이와 같은 LBB 적용의 안전성 향상 효과와 경제적 이득 때문에 차세대 원자로에 있어서도 LBB는 당연히 적용되는 것으로 인식되고 있다.

이번 전문가 회의에서도 차세대 원자로인 EPR, Advanced WWER-

1000, AP600, System 80+ 등의 LBB 적용에 관한 발표가 있었다.

EPR은 Framatome과 Siemens에 의해 설계되고 있는 1,500MWe급의 4-loop형 evolutionary 원자로이다.

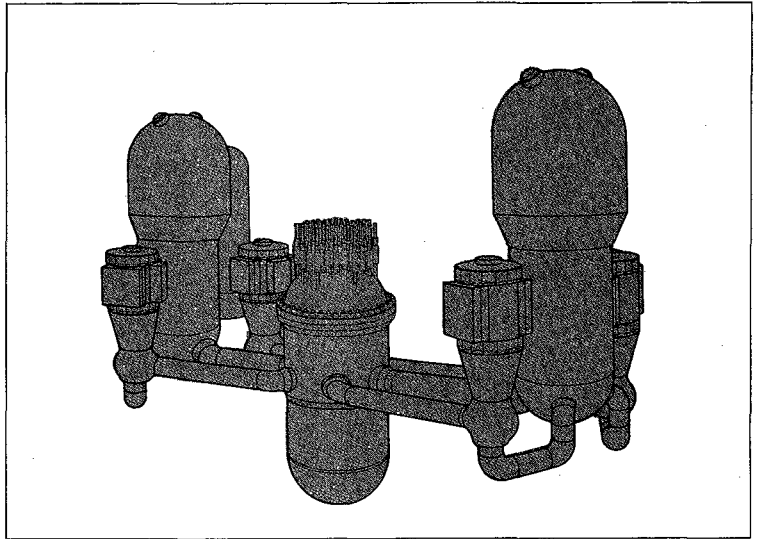
기본 설계는 97년 중반에 완성될 예정인데 N4 및 Konvoi와 기본적으로 유사하다.

EPR의 경우는 주냉각재 배관에 대하여 배관 파단 배제 개념을 적용하려고 하는데, 개념적으로는 독일의 방식에 근거를 두고 있으며, 배관 파단에 따른 위험을 최소화하기 위해 용접부의 최소화, 단조품의 사용 등 설계 및 제작 단계에서의 고려 사항과 운전중에 수행될 검사 관련 사항을 포함하고 있다.

Advanced WWER-1000에 대해서는 1차 계통 배관에 이미 적용된 바 있는 LBB 방법론 및 기준을 증기 배관에 대해서도 적용하기 위해 고려되고 있는 제반 기술적 사항과 향후에 해야 할 과제가 소개되었는데, 향후의 과제로서 가동중 검사의 주기 및 정도, 누설 감지 계통의 감지 능력, 실제 크기의 배관 파괴 실험 등에 대한 연구의 필요성이 강조되었다.

미국에서는 10 CFR 52에 따라 설계 인증을 받기 위해 신청된 evolutionary 및 passive ALWR에 대해서 LBB의 적용을 승인하고 있다.

단 이 승인은 설계 인증 단계에서 예비 해석 결과를 사용하여 적절한 bounding limit가 설정되고, 통합 운



시스템 80+의 표준 NSSS 디자인 구조도

영 허가(COL) 단계에서 적절한 ITAAC(Inspections, Tests, Analyses, and Acceptance Criteria) 이행을 통해 검증되어야 한다는 제한이 붙어 있다.

웨스팅하우스사측에서는 AP600에 대한 LBB 적용 방안으로서 Bounding Analysis Curve(BAC)에 의한 LBB 평가 방법을 제시하고 AP600에의 적용 방안을 발표하였다.

BAC의 개발에 사용된 방법론 및 기준은 GDC-4와 SRP 3.6.3을 근간으로 하고 있다.

또 누설량 기준으로서 0.5gpm을 사용하고 있다.

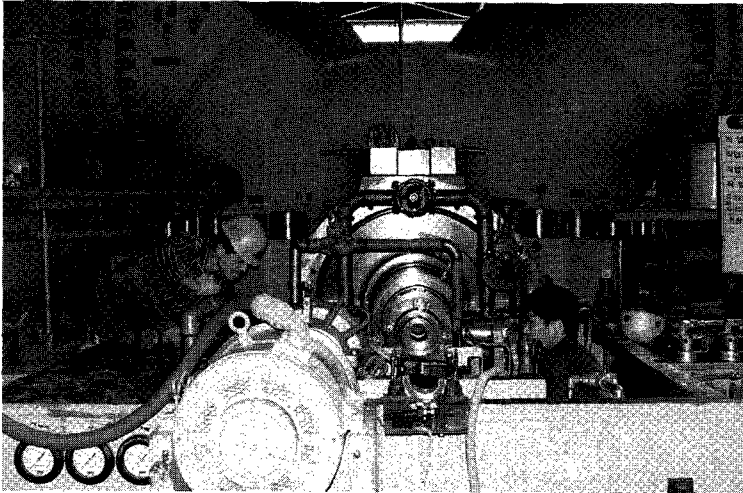
웨스팅하우스사측은 이 방법의 장점으로서 대상 배관에 대한 LBB 적용성을 미리 평가할 수 있음을 들고 있다.

그러나 AP600에 적용하기 위해 제안된 이 방법론에 대해서 US NRC는 LBB를 주급수 배관과 4인치 이하의 소형 배관에 적용하는 것과 0.5gpm의 누설 기준을 Tech. Spec. 및 LBB 해석에 사용하는 데 대해서는 이의를 제기하고 있다.

한편 System 80+ 설계에서는 10인치 이상의 Class 1 배관과 증기기 배관에 LBB가 적용된다.

ABB-CE사 측은 배관의 허용 응력 한계에 근거한 응력 window 개념을 제시하고 COL 단계에 가서 LBB 적용 타당성을 보이는 방안을 제안하였다.

US NRC는 ABB-CE사의 방법이 타당성이 있다고 결론짓고, ABB-CE사로 하여금 bounding LBB 해석을 제출하여 검토받도록 하였다.



영광 원전의 LP TBN 보수 장면

System 80+에서는 주냉각재 배관, 밀림관, direct vessel injection 배관, 정지 냉각 배관, 주증기 배관에 대하여 LBB가 평가될 예정이다.

4. LBB 평가 기술

LBB 방법론에 관한 기술적인 사항으로서 결함의 발생 감지 형상 결정 등 LBB 평가 변수, 균열 성장, 누설 면적 평가, 누설률 평가, 임계 균열 크기, 재료 물성치 측정 등에 관한 많은 논문이 발표되었다.

아울러 LBB 적용에 따른 보완적 수단으로서의 누설 감지, LBB 적용에 있어서 확률론적 파괴 역학적 평가를 위한 불확실도 해석 등에 관한 논문도 발표되었다.

발표 내용을 종합해 볼 때, 90년대에 들어와서 LBB에 관련된 균열 해석 기술 개발 및 그 실증 실험, 재료

파괴 물성치 데이터베이스 구축 등 배관 건전성 관련 연구 개발이 활발하게 추진되었고, 특히 96년말에 종료될 예정인 배관 건전성 국제 공동 연구(IPIRG)에서 상당한 양의 실험 데이터가 확보된 것으로 발표되고 있다.

또 여러 나라의 원자력발전소에 대해서 LBB 평가가 수행되고 있고, 아울러 가동중인 원자력발전소에서의 누설량 측정 결과와 관련 운전 경험도 보고되는 단계에 이르렀다.

이러한 모든 실험적 해석적 연구 조사의 결과나 운전 경험들은 파단전 누설에 대한 규제 기준을 개발하는 데 유의하고 중요한 근거를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

결론 및 소감

LBB '95에서는 원전의 안전성 평

가시 LBB 기술의 역할, 기존 원전에서의 LBB 적용 현황, 차세대 원자로에서의 LBB 적용, LBB 적용에 따른 안전 여유 평가 등에 대한 내용이 광범위하게 발표되었고, 또한 균열의 특성 및 성장 임계 균열의 크기, 누설 면적 및 누설률 평가에 대한 기술적인 문제점과 현안 사항 등이 심도있게 다루어졌다.

특히 이번 LBB '95에는 각 나라에서의 LBB 적용 현황과 규제 정책, LBB 방법의 한계, 그리고 관련 기준의 개선에 관한 사항들에 많은 관심이 집중되었다.

LBB 전문가 회의에서 발표된 각 나라의 규제 입장과 보완적 조치들은 우리의 LBB 규제 기준과 입장을 정하는 데 좋은 참고가 될 것으로 생각되었으며, 각 나라 전문가들이 제시한 기술적·규제 정책적 견해들은 우리의 접근 방식을 새로운 시각에서 검토하게 하는 값진 충고로 느껴졌다.

필자가 이번 전문가 회의에 참가하면서, 그리고 IPIRG-2 멤버로서 지금까지 수 차례의 TAG 회의에 참석하면서 느낀 점 중에서 소개하고 싶은 한 가지는 서로 존중하고 인정해주는 성숙된 회의 매너이다.

이들은 발표되는 연구 내용이나 결과가 아무리 작고 사소한 것일지라도 그 가치를 인정하며 관심을 가지고 소중하게 대한다. 자신의 연구결과에 대해서도 마찬가지이다. 본받을 점이라 생각된다. ☺