

발전로 계통설계에 있어서의 ASME Code 적용

손 갑 현

Application of ASME Code to NSSS Design

Gap-Heon Sohn



- 손갑현(한국원자력연구소 원전설계본부)
- 1951년생.
- 원자력발전소 주요계통 및 기기의 기계설계분야에서 일하고 있으며, 파괴역학적 평가 및 해석과 ASME Code Section III의 적용에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

국내에서의 원자력발전 현황을 보면, 8기의 가압경수형 원자로와 1기의 CANDU형 중수로가 운전 중에 있으며, 설계, 건설 중인 것으로는 4기의 가압경수형 및 3기의 CANDU형 원자로가 있다. 이들 원자력발전소의 주요계통에 포함된 기기 및 구조물(components and structures)들은 그 안전성의 중요도에 맞게 구조적인 건전성(structural integrity) 및 기능성(functional capability)이 확보되어야 하는 바, 이를 위해서는 엄격한 기술기준(codes and standards)의 적용이 필요하다. 이러한 기술기준 중의 하나로써 원전설계에 적용되는 중요한 것이 ASME Code이다. ASME Code는 11개의 Section으로 구성되어 있는데, 이 중 특히 Section III(Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components)가 원전 주요계통의 기기 및 구조물의 제작 및 설치와 관련하여 재료, 설계, 공작(fabrication), 검사, 시험, 공인검사 및 보증 등에 적용되고

있다. Section III 이외에도 Section II(Material specification), Section V(Non-destructive Examination), Section VIII-(Pressure Vessels), Section IX(Welding and Brazing Qualifications) 및 Section XI(Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components) 등이 원자력발전소와 관련하여 직접 또는 간접적으로 적용되고 있다. ASME Code 및 특히 Section III와 관련한 비교적 상세한 내용에 대해서는 다른 문헌⁽¹⁾을 참고하기 바란다.

원자력발전소의 기기 및 구조물에 대한 ASME Code의 적용은 기기 및 구조물 자체와 이들을 포함하고 있는 계통의 안전성(safety) 및 품질(quality) 유지 관점에서의 중요도에 따라 정해지는데, 이러한 안전성 및 품질상의 중요도를 평가하여 결정하는 것이 계통설계(system design)의 주요 수행내용 중의 하나다. 계통설계에서는 이외에도 기기 및 구조물에 적용되는 제반 설계요건(design requirements)들을 설정하여야 하며, 이러한 사항은 계통설계 결과로서 설계시방서(design specification)에 종합적으로

기술된다. 설계 시방서의 기술 내용은 ASME Sec. III에서 규정하고 있다.⁽²⁾

이 글에서는 발전로의 계통설계에 대해서 간단히 설명하고, ASME Code의 적용과 관련하여 주요계통의 구조물, 기기의 안전등급 및 품질등급의 개념과 실제 발전소에서의 적용예를 소개하고자 하며, 끝으로는 설계시방서의 내용을 살펴봄으로써 계통설계 및 ASME Code 적용에 대한 이해를 돕고자 한다.

2. 발전로 계통설계

발전로 계통설계는 일반적으로 핵증기 공급계통(Nuclear Steam Supply System : 흔히 줄여서 NSSS로 부름)에 대한 계통설계를 말한다. 핵증기 공급계통은 원자로를 포함하는 주 계통인 원자로 냉각재계통(Reactor Coolant System)과 여러 개의 보조계통으로 구성되어 있다. 보조계통은 원자로 냉각재계통이 안전하고 효율적으로 운전할 수 있도록 조절기능과 안전기능 등을 담당하는 것으로서, 안전주입/정지냉각계통(Safety Injection/Shutdown Cooling System), 화학 및 체적제어계통(Chemical and Volume Control System), 핵연료 취급계통(Fuel Handling System)과 원자로 제어봉 구동장치(Control Element Drive Mechanism) 및 기타 보조기기들로 구성되어 있다.

계통설계(System Design)를 개괄적으로 표현한다면, 상기와 같은 계통들에 대한 주요기능들을 정립함으로써, 계통변수를 결정하고 기기 및 구조물의 구성과 이들의 안전등급을 포함한 설계요건을 결정하는 것으로 볼 수 있다. 이러한 과정에서 필수적으로 수행되어야 하는 일은 발전소 종합설계자(architect engineering) 및 부품설계/제작자(component design/manufacturing)와의 연계사항(engineering interfaces)에 대한 고려이다. ASME Code의 적용은 부품설계/제작

자와의 연계사항의 하나로 볼 수 있는데, 부품설계 및 제작시 계통설계 결과인 설계시방서의 요건을 만족시킴으로써 충족된다.

계통설계의 주요분야로는 유체계통설계, 기계설계, 계측 및 제어설계, 핵설계, 계통안전해석 및 시운전기술 등이 있는데 이들중 유체계통설계분야와 기계설계분야에서 모든 기계부품의 설계시방서들이 취급되고 있다. 그러나 설계시방서에 포함된 모든 자료나 내용이 유체계통설계와 기계설계에 의해서 구해지는 것은 아니며, 그외의 설계분야에서도 많은 설계자료를 제공하고 있다. 특히 계통안전해석분야에서는 성능해석을 통하여 기기에 적용되는 각 설계과도상태(design transients)에 대한 압력, 온도 및 유량의 변화를 제공하고 있는데 이것은 설계시방서의 주요부분을 차지하는 운전하중의 일부로서, 피로해석에 사용된다.

3. 기기 및 구조물의 등급분류

핵증기 공급계통의 주요기기 및 구조물을 보면, 원자로 냉각재계통의 핵심부품인 원자로, 증기발생기, 가압기, 냉각재펌프, 가압기안전밸브 및 1차 배관 등과 원자로내부구조물 및 부품 지지구조물 등이 있고, 그외의 계통에는 여러가지 펌프, 밸브, 열교환기, 이온교환기 탱크 및 필터 등의 기기들이 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 이들 기기들은 그것의 기능 및 안전성의 중요도에 따라 등급을 정하게 되며, 그 등급에 기준하여 부품의 설계가 이루어지게 된다. 각 부품에 부여되는 등급으로는 안전등급(safety class), 품질군(quality group) 및 내진등급(seismic category) 등이 있으며, 이들에 따라 적용기술기준(ASME Code 또는 기타 산업 기술 기준)이 달라지게 된다.

3.1 안전등급 분류

안전등급 분류는 미국의 ANSI/ANS 51.1

-1983⁽³⁾에 따라 안전등급 1, 안전등급 2, 안전등급 3 및 비원자력 안전등급(Non-Nuclear Safety)의 4가지로 나눈다. 각 부품의 안전등급은 이들에 적용될 기술기준 및 품질보증(quality assurance)규정뿐만 아니라 내진등급을 결정하는 지침이 되기 때문에 가장 기본적인 등급분류로 볼 수 있다.

(1) 안전등급 1

원자로 냉각재압력경계(Reactor Coolant Pressure Boundary : 흔히 줄여서 RCPB로 부름)를 구성하는 가압부품과 지지구조물(supports)로서, 그것의 파손으로 인하여 정상적인 충전능력 이상의 원자로 냉각재 상실을 초래할 수 있는 기기를 말한다. 이 등급에 속하는 기기들은 ASME Code Section III의 적용대상이 되며, 예로서는 원자로 용기, 증기발생기(1차측), 가압기, 원자로 냉각재펌프, 가압기안전밸브 등이 있다.

(2) 안전등급 2

RCPB를 구성하지만 안전등급 1이 아닌 기기나 안전기능을 수행하도록 설계된 안전계통의 기기를 말한다. 여기서 안전기능이라 함은, 예를 들면, 원자로를 미임계상태로 하기 위한 긴급 부반응도 삽입기능(봉산주입계통) 및 비상노심냉각을 보장하는 기능(안전주입/정지냉각계통) 등을 말한다. 이 등급에 속하는 것으로는 안전주입계통의 저압 및 고압 안전주입펌프, 안전주입탱크와 화학 및 체적제어계통의 재생열교환기, 이온교환기, 체적제어탱크 및 충전펌프 등이 있다.

(3) 안전등급 3

안전등급 1이나 안전등급 2에 속하지 않는 기기로서, 그것의 파손에 의하여 방사성기체를 환경으로 방출할 수 있는 경우나 특정한 기능을 수행하도록 설계된 것을 말한다. 특정한 기능이라 함은, 예를 들면, 노심반응도 제어 또는 냉각능력을 보장하기 위한 원자로 내의 기하학적 구조의 유지기능이나 미임계 원자로상태에 도달하거나 유지하기 위한 부반응도 삽입기능 등을 말한다. 이 등급의 기

기에도 ASME Code Section III이 적용될 수 있으며, 이에 속하는 기기로는 노심지지 구조물(원자로 내부구조물), 봉산보충펌프, 원자로배수펌프 및 기기배수탱크 등이 있다.

(4) 비원자력 안전등급

안전등급 1, 안전등급 2 또는 안전등급 3에도 속하지 않으며, 원자력 안전기능의 수행이 요구되지 않는 기기를 말한다. 이 등급의 기기에는 일반적으로 ASME Code III이 적용되지 않는다. 화학 및 체적제어계통에서, 앞에서 언급한 것을 제외한 대부분의 기기와 핵연료 취급계통의 대부분의 기기는 비원자력 안전등급에 속한다. 즉, 원자로 충수 펌프 및 탱크, 원자로배수탱크, 핵연료교체 기기, 핵연료 이송관밸브, 핵연료저장랙 및 노심지지구조물 인양장치 등이다.

3.2 품질군 분류

미국의 연방법규인 10CFR 50⁽⁴⁾의 Appendix A “원자력발전소 일반설계기준(General Design Criteria)”의 기준 1(Criterion 1)에 의하면 안전에 중요한 구조물, 계통 및 기기 등은 안전성의 중요도에 부합하는 품질기준에 따라 설계, 제작, 설치 및 시험되어야 함을 요구하고 있다. 이에 따라 미국 원자력 규제위원회(Nuclear Regulatory Commission : 줄여서 NRC로 부름)에서는 규제지침(Regulatory Guide) 1.26⁽⁵⁾을 마련하여 주요 구조물 및 기기의 품질군을 다음과 같이 네 가지로 분류하도록 하고 있다.

(1) 품질군 A

10 CFR 50의 Section 50.55a에서는 원자로 냉각재압력경계(RCPB)에 속하는 기기 및 구조물 등은 ASME Code Section III의 등급 1(Code Class 1)에 대한 요구사항이나 이와 동등한 품질기준에 따라 설계, 제작, 설치 및 시험되어야 함을 요구하고 있는데 이들이 품질군 A다. 주로 원자로 냉각재계통 내의 기기와 이에 연결되는 부위에 있는 기기들로서 일반적으로 안전등급 1에 속한다.

(2) 품질군 B

품질군 B는 RCPB의 일부이지만 품질군 A에 해당되는 것을 제외한 기기나 구조물이거나, RCPB가 아닌 계통의 일부로서, 물이나, 증기를 포함하는 압력용기, 열교환기, 저장탱크, 배관, 펌프 및 밸브 등을 말하는데 일반적으로 안전등급 2에 속한다.

(3) 품질군 C

품질군 C는 RCPB나 품질군 B에 포함되지 않는 것으로서 주요 대상기기는 품질군 B에서와 유사하며, 일반적으로 안전등급 3에 속한다.

(4) 품질군 D

RCPB나 품질군 B 및 C에 속하지 않지만 방사성물질을 함유하거나, 함유할 수 있는 계통의 일부로서 물이나 증기를 함유한 기기를 말하며, 일반적으로 비원자력 안전등급에 속하며, ASME Code Section III가 적용되지 않는다.

류도 10 CFR 50 Appendix A의 일반설계 기준에 근거하고 있다. 일반설계기준 2(General Design Criterion 2)에 의하면 원자력발전소에 있어서 안전성에 중요한 구조물, 계통 및 기기들은 지진으로 인하여 안전기능을 수행할 능력을 상실하지 않도록 설계되어야 함을 요구하고 있다. 또한 10 CFR 100⁽⁶⁾의 Appendix A, "Seismic and Geologic Siting Criteria for Nuclear Power Plants"에서는 좀더 구체적으로, 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake : SSE)시에도 어떤 구조물, 계통 및 기기는 그 기능을 유지하여야 함을 요구하고 있다. 내진등급 분류를 위하여 미국 원자력 규제위원회에서는 규제지침(Regulatory Guide) 1.29⁽⁷⁾를 마련하였으며, 이에 따르면 모든 기기 및 구조물은 내진등급 I(Seismic Category I)과 비 내진등급(Non-seismic)으로 나뉘어진다.

(1) 내진등급 I

앞에서 10 CFR 100 Appendix A를 인용하여 설명한 바와 같이 안전정지지진을 견디어 기능을 유지하도록 설계되어야 하는 기기나

3.3 내진등급의 분류

품질군 분류에서와 마찬가지로 내진등급분

표 1 등급분류의 상호관계 및 적용 기술기준

안 전 등 급	품질군	내진등급	적용기술기준
● 안전등급 1 - 기기 - 지지구조물	A A	I I	ASME III, NB ASME III, NF
● 안전등급 2 ^(주1)	B	I	ASME III, NC
● 안전등급 3 ^(주1) - 노심지지구조물을 제외한 기기 및 구조물 - 노심지지구조물	C C	I I	ASME III, ND ASME III, NG
● 비원자력 안전등급 - 압력용기, 배관, 펌프 밸브 등	D	비내진등급 ^(주2)	ASME VIII, DIV. 1 ANSIF, API, AWWA TEMA 등 기술기준

주 1 : 안전등급 2 및 안전등급 3의 기기에 대한 지지구조물에는 ASME III, NF가 적용된다.

주 2 : 예외로서 원자로 용기두껍 인양장치 및 핵연료 저장랙은 비원자력 안전등급이지만 내진등급 I에 속한다.

구조물을 말하며, 대부분의 안전등급 1, 2 및 3에 속하는 것들에는 내진등급 I이 적용되는데, 경우에 따라서는 비 원자력 안전등급에도 내진등급 I (Seismic Category I)이 적용되는 수가 있다.

(2) 비내진등급

내진등급 I에 속하지 않는 모든 기기 및 구조물은 비내진등급(Non-Seismic)인데 대부분의 비원자력 안전등급이 이에 속한다.

이상에서 원자력발전소의 기기 및 구조물에 대한 등급분류방법을 살펴보았는데 이들 간에는 상호연관 관계가 있으며, 각 기기의 등급에 따라 적용 ASME Code 및 기타 산업기술 기준이 정해진다. 표 1은 이러한 내용을 일목요연하게 요약한 것이다.

4. 설계시방서의 주요내용

앞에서 언급한 바와 같이 설계시방서는 각 기기나 구조물의 설계에 기본이 되는 계통설계문서로서, 이들 기기나 구조물의 특성 및 중요도에 따라 차이가 있지만 대체로 다음과 같은 내용이 포함되어야 한다.⁽²⁾

- 기기나 지지구조물의 형태에 대한 정의
 - 설계 및 운전하중, 하중조합방법 및 설계한계치와 기능적 요건
 - 방사선을 포함한 환경조건
 - 각 품목의 적용 코드분류 및 적용경계 (jurisdictional boundary)
 - 충격시험을 포함한 재료특성에 대한 요건
 - 기기의 작동성 (operability) 요건을 충족시키기 위한 적절한 자료의 인용
- 설계시방서는 위와 같은 내용을 포함하여 ASME Code Section III에 따라 기기나 구조물이 설계, 제작, 설치 및 실험될 수 있도록 충분한 자료를 수록하여야 한다.
- 실례로서 울진 원자력 3, 4호기의 원자로 용기 설계시방서의 내용을 간단히 살펴보고자 한다. 원자로 용기는 RCPB에 속하는 것

으로 원자력발전소에서 가장 중요한 기기이기 때문에 시방서의 내용이 매우 상세하고 방대하다.

- 원자로용기 구성품의 정의 : 원자로 용기는 원통형 용기, 분리가능한 상부덮개, 일체로 된 패드, 덮개체결스터드, 볼트 및 와셔와 노즐 등으로 구성되어 있다.
- 원자로용기는 안전등급 1, 내진등급 I로서, ASME Code Section III NB가 적용되는 코드등급 1인 기기다.
- 적용경계 (jurisdictional boundary) : ASME Code Section III의 NB와 NF의 적용경계를 일체로 된 지지패드의 하부면과 노즐 끝단으로 정의하고 있다.
- 기계설계 및 열수력 설계자료 : 설계압력, 온도, 유량, 설계수명(40년), 주요 치수 및 노즐자료를 주고 있다.
- 용기설계 상세사항으로 각 부분품(볼트, 각종 노즐 및 부착물, 플랜지 등)의 설계시 고려해야 할 사항이 기술되어 있다.
- 주요 하중조건의 하나로서 원자로 냉각재펌프의 회전으로 인한 가진에 대하여 진동수 및 진폭과 회전속도, 펌프날개통과 진동수 등을 주고 있다.
- 환경요건 : 감마선 및 베타선의 총누적 피폭량, 정상운전시의 온도, 압력 및 상대습도와 사고후의 온도, 압력, 상대습도 및 화학분사조건이 주어져 있다.
- 과도운전조건 : 열수력적 과도조건(온도, 압력 및 유량의 변화) 및 ASME Code Section III, Appendix G에 따른 취성과 피방지를 위한 운전한계가 주어져 있다.
- 내진설계 : 응답스펙트럼이 주어지며, 내진해석은 2개의 수평방향 및 1개의 수직방향에 대한 응답스펙트럼해석으로 수행된다.
- 재료에 대한 요건 : 허용재료의 목록, 원자로 냉각재와 접촉하는 부위에 사용되

는 재료, 불안정 오스테나이트 스테인리스강에 대한 요건, 텔타페라이트요건, 충격시험 및 사피충격시험에 대한 사항, 재료의 화학성분과 기타 감시시험재료, 해로운 재료 및 열처리 등에 대해서 기술되어 있다.

이러한 사항 외에도 냉각재의 화학적 특성, 과압보호, 품질보증요건, 시험요건, 비파괴검사요건 및 기타 세정, 확인 및 운송 등에 대한 사항도 기술되어 있다.

5. 맺음말

발전로 계통설계와 ASME Code의 적용과의 상호연관성을 이해하기 위하여, 관련되는 내용으로서, 계통설계의 개요, 원자력발전소의 기기 및 구조물의 등급분류 및 실례를 개괄적으로 살펴보았다. 앞에서 본 바와 같이 계통설계 결과로서 부여되는 기기 및 구조물의 등급은 바로 적용 ASME Code 또는 기타 산업기술기준을 결정하는 근거가 되는데, 이것은 원자력 규제법규나 지침 등에 근거하고 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 내용에 대한 정확한 이해는 각 기기나 구조물의 설계에 꼭 필요함은 물론, 원자력발전소의 인허가를 위시한 규제업무를 충분한 안전성을 확보하면서, 합리적으로 수행하는데 매우 유용하리라고 판단된다. 뿐만 아니라 앞으로 국내에서 독자적인 기술기준을 마련하여 적용하고자 할 때 이러한 사항들이 일관성 있고 균형있게 반영되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) 손갑현, 1992 "ASME Code에 의한 압력용기 및 배관계통의 강도설계," 대한기계학회, '92년도 피로 및 파괴역학을 고려한 강도설계 기술강습회 자료, pp. 141 ~165.
- (2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, "Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components," Sub-section NCA, "General Requirements," NA-3000.
- (3) ANSI/ANS 51.1-1983, 1983, "American National Standard Nuclear Safety Criteria for the Design of Stationary Pressurized Water Reactor Plants."
- (4) Title 10 of Code of Federal Regulations Part 50(10 CFR 50), "Licensing of Production and Utilization Facilities," Appendix A, "General Design Criteria for Nuclear Power Plants."
- (5) US NRC Regulatory Guide 1.26-1976, 1976, "Quality Group Classifications and Standards for Water-, Steam, and Radioactive-Waste-containing Components of Nuclear Power Plants."
- (6) Title 10 of Code of Federal Regulations Part 100(10 CFR 100), "Reactor Site Criteria."
- (7) US NRC Regulatory Guide 1.29-1987, 1987, "Seismic Design Classification." 