

<연구논문>

일차수응력부식균열(PWSCC) 및 염화이온부식균열(CISCC) 저감용 표면개질기술 적용을 위한 코드케이스 개발

조성우[†] · 편영식^{*} · Nick Mohr^{**} · Jon Tatman^{**} · John Broussard^{***} · Jean Collin^{***} · 이원근^{****} ·
오은종^{****} · 장동현^{****} · 구경희^{*****} · 황성식^{*****} · 최선웅^{*****} · 홍현욱^{*****}

Development of New Code Case “Mitigation of PWSCC and CISCC in ASME Code Section III Components by the Advanced Surface Stress Improvement Technology

Sungwoo Cho[†], Youngsik Pyun^{*}, Nick Mohr^{**}, Jon Tatman^{**}, John Broussard^{***}, Jean Collin^{***},
Wongun Yi^{****}, Eunjong Oh^{****}, Donghyun Jang^{****}, Gyeong Hoi Koo^{****},
Seong Sik Hwang^{*****}, Sun Woong Choi^{*****} and Hyun UK Hong^{*****}

(Received 21 February 2019, Revised 20 May 2019, Accepted 17 June 2019)

ABSTRACT

In nuclear power plant operation and spent fuel canisters, it is necessary to provide a sound technical basis for the safety and security of long-term operation and storage respectively. Recently, the peening technology is being discussed and the technology will be adopted to ASME Section III, Division 1, Subsection NX (2019 Edition). The peening is prohibited in current edition, but it will be approved in 2019 Edition and adopted. However, Surface stress improvement techniques such as the peening is used to mitigate SCC susceptible in operating nuclear plants. Although the peening will be approved to ASME CODE, there are no performance criteria listed in the 2019 edition. The Korean International Working Group (KIWG) formed a new Task Group named “Advanced Surface Stress Improved Technology”. The task group will develop a CODE CASE to address PWSCC(Primary Water Stress Corrosion Cracking) and CISCC(Chloride Induced Stress Corrosion Cracking) for new ASME Section III components. TG-ASSIT was started to make peening performance criteria for ASME Section III (new fabrication) applications. The objective of TG-ASSIT is to gain consensus among the relevant Code groups that requirements/mitigation have been met.

Key Words : Peening (피닝), PWSCC(Primary Water Stress Corrosion Cracking) (일차수응력부식균열), CISCC (Chloride Induced Stress Corrosion Cracking) (염화물응력부식균열), Advanced Surface Stress Improved Technology (고도화된 표면응력개선기술)

† 책임저자, 조성우, 두산중공업

E-mail : sungwoo1.cho@doosan.com

TEL : (055)278-5879 FAX : (055)278-8510

* 선문대학교

** EPRI(Electric Power Research Institute), 미국

*** Dominion Engineering, 미국

**** 두산중공업

***** 한국원자력연구원

***** 한남대학교

***** 창원대학교

1. 서 론

최근 원자력산업 및 원자력 관련 제품에 가장 중요 시되는 사항은 안전 및 품질일 것이다. 원자력 산업 및 원자력 제작코드(KEPIC/ASME)는 기본 제작기술 뿐만 아니라 품질불량 및 안전과 관련된 최신 기술을 제작에 적용하고 제작코드에도 반영되고 있다. 특히 미국을 주축으로 하는 ASME(American Society of Mechanical Engineers)에서는 보다 적극적으로 최신 기술을 코드에 반영하고 있는 추세이다. 그 대표적인 예가 피닝기술과 같은 표면개질기술이다.

해외의 일부 가동중 원자력발전소의 인코넬600용 접부에는 일차수용력부식균열이라는 PWSCC(Primary Water Stress Corrosion Cracking)가 발생하곤 하였다. 이를 완화하는 기술을 적용하여 기기의 안전성과 수명을 연장할 뿐 아니라 운전비용도 절감하려는 목적으로 ASME CODE CASE N-729-6 “Alternative Examination Requirements for PWR Reactor Vessel Upper Heads With Nozzles Having Pressure-Retaining Partial-Penetration Welds Section XI, Division “과 N-770-5” Alternative Examination Requirements and Acceptance Standards for Class 1 PWR Piping and Vessel Nozzle Butt Welds Fabricated With UNS N06082 or UNS W86182 Weld Filler Material With or Without Application of Listed Mitigation Activities Section XI, Division 1 “이 개발되어 미국 및 일본 등의 가동중 발전소에 피닝 기술이 적용되었다. 상기 CODE CASE 들은ASME 산하조직인 Task Group of High Strength Nickel Alloy Issues(TGHSNAI)의 약 6년간(2009년1월 26일에 시작하여 2015년 10월7에 완료)이상의 노력으로 제정되었다.⁽¹⁾ 그러나 신규 원전기기 제작에 사용될 피닝과 같은 표면개질 기술에 기술기준은 아직 없다. 피닝 기술을 허용하기 위한 CODE CASE 개정 작업은 아직 ASME Section III - Task Group on Weld Residual Stress (WRS) for New Plant 에서 4년이상 작업중이고 2019년중에는 완료가 될 것으로 예상된다. 본 WRS에서 개정한CODE는 ASME SECTION III 에 사용될 목적이다. 그러나 이 개정이 이루어 진다 해도 신규 원자력 기기 제작에 사용될 구체적인 기술 표준은 아직 준비되지 않고 있는 실정이다.

새로운 원전기술 개발과 도입을 선도하면서 우리나라 원전산업 진흥을 위해 활동하는 ASME 산하 KIWG(Korea International Working Group)에서 한국

위원 중심으로 Task Group-ASSIT(Advanced Surface Stress Improvement Technology)을 2018년 3월8일에 구성하고, 구체적인 표면개질 기술의 성능 요건과 합격 기준 등을 포함하는 CODE CASE를 개발하기 시작 하였다. ASME Code Week(미국Dallas) 에서 Kick-off Meeting을 2018년 5월 8일 실시하고 국제 위원을 초빙 하기 시작하여 현재는 4개국의 20여명이 참여하는 명실상부한 Task Group으로 발전해 나가고 있다. 특히 2018년 7월 23일 ASME Code Week(Washington D.C) 의 미팅에서 PWSCC 뿐만 아니라 최근 이슈 되고 있는 CISCC(Chloride-induced Stress Corrosion Cracking) 문제(CISCC는 사용후핵연료 건식저장장치의 Canister 의 용접부 및 주위에서 발생하는 염화물에 의한 응력 부식균열임)등을 포함한 SCC전반에 대한 심도 있는 논의가 있었으며, 이 결과를 ASME 산하조직인Sub Group “Materials Fabrication and Examination” (7월 24일)과 ASME Executive Committee(7월 25일)에 보고 하여 Task Group의 Mission과 Scope에 대한 승인과 함께 PWSCC와 CISCC를 완화 기술을 함께 해결해 달라는 요청을 받았다. 특히 NRC의 요청을 받아 Task Group High Strength Nickel Alloy Issues” (TGHSNAI) 에서 개정을 진행중인 N-729-6과 N-770-5 작업에도 협력해 달라는 요청을 받았다.

기존에 진행중이던 ASME Section III - Task Group on Weld Residual Stress (WRS) for New Plant은 ASME Section III의 코드를 개정하여 피닝을 허용하는 문구를 추가하는 것이고, 본 TG ASSIT는 ASME Section III 제품 제작에 사용될CODE CASE 개발하는 것이다. 다시말해, 피닝에 대한 합격기준 및 절차기준 을 개발하는 것이다. TG ASSIT에서는 이러한 요청에 부응하여 새로운 CODE CASE를 제정하기 위한 구체적인 Road Map과 기본적인 CODE CASE 구성안을 작성할 계획이다. 필요한 Technical Basis 작업을 위해 EPRI 팀과 국제 협력 기술개발 Project를 구성하여 진행하고 있다. 본 논문은 이러한 진행 사항과 핵심 국내 표면개질기술을 포함한 첨단 표면개질 기술에 대한 ASME code 개정 동향 소개를 하고자 한다.

2. 표면 개질 기술(피닝 기술) 개발 동향

2.1 해외 기술 동향

미국 및 일본은 이미 인코넬 600으로 용접된 부위

에 피닝을 적용한 사례가 많다. 특히 미국의 경우는 원자로헤드 관통노즐의 인코넬600으로 용접된 부위의 PWSCC 방지를 위해 원자로 헤드를 교체하거나, 피닝을 적용하고 있다. 그러나 최근에는 비용절감 및 피닝의 효과가 검증된 결과를 바탕으로 원자로헤드 교체 대신에 기존 원자로헤드 용접부에 피닝을 적용하고 있는 추세이다. 전세계적인 기술로는 shot peening, laser shock peening, water jet peening, ultrasonic peening 등이 대표적이다. 그중에서도 일본과 미국발전소에 가장 널리 사용된 기술은 laser shock peening, water jet peening 이다. 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서도 표면개질 기술관련하여 많은 시험을 수행하였고, 그 결과를 기준으로 공식 보고서(REPORT)를 발행하였다^(2,3).

2.2 국내 기술 동향

해외에서는 용접부 표면의 인장잔류응력을 압축 응력으로 바꾸어 PWSCC를 방지하는 피닝 기술을 원자로로 적용한 사례가 많이 있으나, 아직 한국에서는 본 기술을 제품에 적용한 사례가 없다. 과거 기술인 용접부 오버레이와 같은 기술은 일부 적용되는 사례가 있으나, 피닝을 적용하여 잔류응력을 압축응력으로 바꾸어 PWSCC를 방지하는 사례는 없다.

국내에서는 원자력기기 공급제작사인 두산중공업이 유일하게 원전분야 표면개질기술인 Air Laser Peening 과 Water Laser Peening 적용기술을 활용하고 있다. 또한 LSP와 WJP 기술과는 또 다른 특성을 보유한 선문대와 (주)디자인메카가 개발한 Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification(UNSM) 기술을 원전분야에 적용하기 위해 기술개발 협력을 수행하고 있다.^(4,5,6)

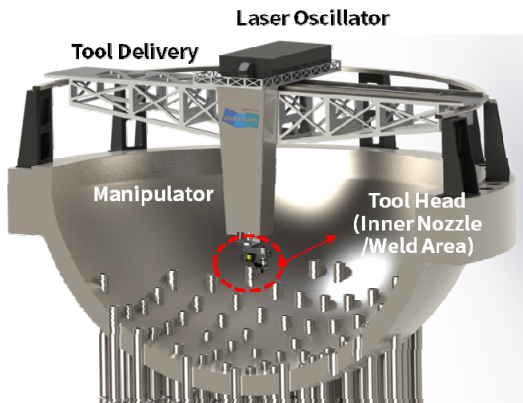


Fig. 1 Laser peening system for reactor vessel head

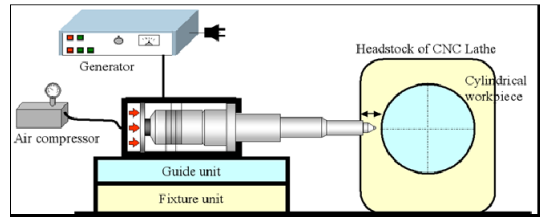


Fig. 2 UNSM device and conceptual diagram

특히 두산-EPRI-선문대가 공동으로 국제협력프로젝트를 구성하였고, PWSCC 완화기술을 원전 신규 제품에 적용하는데 필요한 기술검증과제를 2017년 11월부터 수행하고 있다. 또한 사용후 핵연료 건식저장장치인 Canister(캐니스터)의 용접부 염화이온응력부식균열(CISSC) 방지 관련한 기술검토 및 시험을 할 계획을 수립하였다.

3. ASME CODE 현황

3.1 피닝에 대한 ASME CODE 요건

현재(2017 Edition) ASME CODE NB-4422에서는 하기와 같이 표현되어 있다. NB-4422를 해석하면 용접부의 열처리가 수행되지 않으면, 초층 용접부와 최종층 용접부의 피닝이 금지된다고 표현된다. 그러나, 잔류응력 저감을 목적으로 하는 피닝은 하기 NB-4422 요건에서 제외된다. 실제 피닝을 적용하기 위해서는 혼동이 될 수 있는 부분이다.

NB-4422 Peening

Controlled peening may be performed to minimize distortion. Peening shall not be used on the initial layer, root of the weld metal, or on the final layer unless the weld is postweld heat treated.

또한 NB-NX-4451에서는 하기와 같이 피닝에 대한 언급이 전혀 없다.

NB-4450 REPAIR OF WELD METAL DEFECTS NB-4451 General Requirements

Defects in weld metal detected by the examinations required by Article NB-5000, or by the tests of Article NB-6000, shall be eliminated and repaired when necessary.

3.2 피닝 관련 ASME CODE 변경 방향

2019년 Edition ASME CODE에는 하기와 같이 표

현이 변경될 예정이다. NB-4422의 피닝 항목이 (a)와 (b)로 구분되며, 표면의 잔류응력을 저감시키는 피닝 기술을 허용한다.

NB-4422 Peening (예상 변경안)

(a) Peening is a process (e.g., shot peening, pneumatic needle gun, etc.) that physically deforms the material by cold working for the purpose of controlling distortion. Controlled peening may be performed to minimize distortion. Except for surface stress improvement techniques with the purpose of introducing compressive stresses on a weld or base material in accordance with NB-4422(b), controlled peening shall not be used on the initial layer, root of the weld metal, or on the final layer unless the weld is postweld heat treated.

(b) Surface stress improvement techniques (e.g., waterjet peening, laser peening, etc.) are processes that reduce the residual tensile stresses on the surfaces of welds and base material that were caused by welding or cold working processes. Controlled surface stress improvement techniques that are demonstrated to reduce surface tensile residual stresses can be performed on the final surface in contact with the corrosive environment. Surface stress improvements shall be performed after examinations required by NB-5000 are completed

또한 NB-4451에는 다음과 같은 문구가 추가된다. 응력부식균열(SCC)이 발생할 수 있는 제품 또는 부품의 용접시 NB-4422(b)에서 언급된 잔류응력저감 기술이 적용되지 않는다면 보수 용접은 금지된다. 즉 SCC가 발생할 우려가 있는 부위는 피닝과 같은 Mitigation Action이 추가되어야 한다는 것이다.

NB-4451 (예상 변경안)

Defects in weld metal detected by the examinations required by Article NB-5000 shall be eliminated and repaired when necessary. Weld repairs made on the wetted surface of a component/item susceptible to stress corrosion cracking (SCC) are prohibited unless a mitigation action is applied, such as described in NB-4422(b). The components/items susceptible to Stress Corrosion Cracking are specified in the Design Specification.

4. CODE CASE 제정에 필요한 기술보고서 준비

4.1 일차수용력부식균열(PWSCC) 완화에 필요한 공정 성능 및 합격기준

기본적으로 원자력기기 신규 제작품에 적용할 PWSCC 완화 효과에 대한 목표는 Section XI과 유사하다고 판단되므로 압축잔류응력의 크기와 깊이가 가장 중요한 기준이 된다. 부수적으로 부식특성과 안정성, 검사방법 등에 대한 것이 추가될 수 있을 것이다. Code Case N-729 와 N-770내용중 필요한 성능과 합격기준에 대한 내용을 정리하면 아래 표1과 같다⁽³⁻⁴⁾.

4.2 CISCC완화 및 예방을 위한 성능 및 평가 기준

CODE CASE에 포함해야 할 성능 및 평가기준은 아직 정리할 시점이 되지 않았지만, NRC의 요구하는 100년 이상의 안전한 수명을 만족시키기 위해서 수행해야 할 기술개발 내용을 정리하면 다음과 같다. CISCC를 예방하기 위해서 제어해야 할 환경을 제외하고 1차적으로는 Chloride Induced Pitting과 Crevice 를 지연시키는 소재나 표면개질기술을 개발하는 것이다. 이는 PWSCC에 덜 민감한 인코넬690과 같은 것을 확인하고 사용하는 것이나 이는 원가적인 측면과 판재 생산기술적인 측면에서 아직은 어려운 것 같다. 두산과 선문대가 공동으로 추진하는 새로운 방안은 레이저피닝과UNSM 융합기술을 적용하여 스테인레스 316/304 소재의 표면을 개질하여 Chloride

Table 1 The sample of the peening acceptance criteria

Joints	<ul style="list-style-type: none"> Alloy 82/182 Piping Butt Welds in PWR Primary System Piping PWR Reactor Vessel Upper Head Penetrations and Attachment Welds
Operating Stress	<ul style="list-style-type: none"> The combined operating stress shall not exceed +10 ksi (+70 MPa)
Depth of the Compressive Residual stress	<ul style="list-style-type: none"> Nozzle Outside: Min.1.0 mm Nozzle Inside: Min.0.25 mm
Service life	<ul style="list-style-type: none"> Maintain the surface stress level till end of service life
Etc.	<ul style="list-style-type: none"> Inspectability The capability to perform ultrasonic examinations Lack of Adverse Effects

Induced Pitting과 Crevice를 지연효과를 극대화 하는 연구이다. 다른 한편으로는CISCC의 현재 진행 속도 인 0.11~0.91mm/yr를 획기적으로 지연시킬 뿐 만 아니라 Chloride Induced Pitting과 Crevice가 생성되었다 하더라도 CISCC로 진행하지 않게 하는 기술을 개발 하는 것이다.

5. 결 론

새로운 원전건설에 필요한 PWSCC 완화 기술표준과 새롭게 등장하는 사용후 핵연료 건식저장장치의 수명연장에 필요한 CISCC완화 기술표준을 우리나라 기술진이 주도하여 ASME CODE CASE 제정을 추진하는 시도가 성공적으로 마무리 되어, 새로운 원전기술 개발을 선도하면서 원전 산업 진흥도 함께 달성하는 목표도 같이 달성하는데 기여하고자 한다.

참고문헌

- (1) Dennis P. Weakland, Glenn White and Paul Crooker, 2016, "Incorporating Peening Into ASME Section XI Code Cases N-729 and N-770 for PWSCC Mitigation in Alloy 82/182/600 Locations". *Proc. Of ASME 2016 PVP Conference, Vancouver, BC, July 17-21, PVP2016-64008.*
- (2) John H Jackson, Denise Paraventi, Michael Wright, 2017 "Topical Report for Primary Water Stress Corrosion Cracking Mitigation by Surface Stress Improvement" Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, MRP-267
- (3) ASME BPVC Sec.XI, Code Case N-729-6, 2017, "Alternative Examination Requirements for PWR Reactor Vessel Upper Heads With Nozzles Having Pressure-Retaining Partial-Penetration Welds," American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (4) ASME BPVC Sec.XI, Code Case N-770-5, 2017, "Alternative Examination Requirements and Acceptance Standards for Class 1 PWR Piping and Vessel Nozzle Butt Welds Fabricated With UNS N06082 or UNS W86182 Weld Filler Material with or Without Application of Listed Mitigation Activities," American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (5) EPRI, 2016, Materials Reliability Program : Topical Report for Primary Water Stress Corrosion Cracking Mitigation by Surface Stress Improvement, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA: MRP-335, Revision 3-A
- (6) EPRI, 2016, Materials Reliability Program: Technical Basis for Primary Water Stress Corrosion Cracking Mitigation by Surface Stress Improvement, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, MRP-267, Revision 2