



KR0101217

KAERI/AR-590/2001

증기발생기 전열관 보수기술

Repair Technology for Steam Generator Tubes

한국원자력연구소

32 / 48

제 출 문

한국원자력연구소 소장 귀하

본 보고서를 원자력 중장기 과제인 “원자력 내방사선 로봇개발”과 관련하여 “증기발생기 전열관 보수 기술”에 대하여 기술현황분석 보고서로 제출합니다.

2001년 2월 15 일

주저자 : 김 승 호
공저자 : 정 현 규
정 승 호
김 창 회
정 용 무
서 용 철
김 정 수
서 무 흥

요 약 문

I. 제목

증기발생기 전열관 보수 기술

II. 연구개발의 목적 및 중요성

현재 국내의 원자력 증기발생기는 18기 정도가 운전 중에 있으나 이들의 검사, 정비 기술은 상당부분 국내 기술로 자립하고 있는 실정이나, 보수 기술은 거의 해외에 의존함으로써 발전소의 유지 보수비용이 많이 소요되고, 적절한 검사, 보수기간을 확보하지 못해 전력공급에 차질이 발생하고, 작업자의 피폭량이 증가하며 방사선의 누출 가능성이 커지는 등 여러 가지 문제점이 있는 것으로 지적되어 왔다.

증기발생기 전열관은 방사선 물질 누설 가능성이 높은 원전 부품중의 하나이다. 만일 누설될 가능성이 있는 전열관의 보수가 불가능하여 플러깅하였다면 플러깅비용이 플러깅한계(약 10%)이상으로 상승하는 경우에 증기발생기의 교체가 필요하다. 증기발생기 교체는 비용이 수백억원 소요되는 것은 물론 방사능 제거 문제가 계속 남을 가능성이 높고, 해외기술에 의한 보수비용은 국내의 독자적인 기술 개발이 없을 경우에 더욱 상승할 가능성이 크므로 반영구적으로 증기발생기를 재사용 할 수 있는 보수기술을 개발하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 보고서에서는 증기발생기 보수기술 설계 요건으로 슬리브 재료 및 치수, 설치 방법, 자격요건에 대한 문헌을 검토, 정리하였다. 슬리브 재료로 사용되는 Inconel 600, Inconel 690, Incoloy 800에 대한 특징을 분석하였으며, 슬리브 확관 및 기밀 유지 방법에 따른 잔류응력의 고저를 판별할 수 있는 실험방법과, 보수기술 자격요건을 만족하기 위해 검증되어야 할 사안들에 대하여 조사하였다.

현재 보수기술을 보유하고 있는 ABB CE, FTI, Westinghouse사를 중심으로 각사가 보유하고 있는 슬리브 기술에 대하여 조사하였다. ABB CE사가 보유하고 있는 Welded Sleeve 기술 3종류와 PLUSS Sleeve 기술, FTI사가 보유하고 있는 재순환형 증기발생기에 적용 가능한 Brazed, Kinetic Sleeve 기술과 일체형 증기발생기에 적용 가능한 Hydraulic, Roller Sleeve 기술, 그리고 전기주조(Electroforming)를

이용한 Electrosleeving 기술, Westinghouse사가 보유하고 있는 HEJ, Laser Welded Sleeve 기술에 대한 설치방법 및 특징을 분석하였다.

IV. 연구개발결과

슬리브 재료로 1983년까지는 Inconel 600 MA 및 TT가 주로 사용되었으나 요즘에는 PWSCC 저항성이 우수한 Inconel 690 TT가 주로 사용된다. 슬리브 길이는 레이저 용접 슬리빙은 150mm, FTI사의 Electrosleeving 보수 기술은 200mm이하로 축소가 가능하며, ABB CE 및 Westinghouse사의 Direct Tube Repair 보수 기술은 최소 26mm 까지도 가능하다. 슬리브 벽두께는 전열관 벽두께보다 약간 작은 것이 좋으며, Radial Clearance는 원하는 보수 위치에 도달하는데 방해받지 않을 0.30~0.46mm가 적당하며 작을수록 좋다. 확관 방법에 따라 SCC 발생율은 Mechanical-Roll이 가장 높았으며, Hydraulic Expansion이 가장 낮았다.

슬리브를 설치하기 위해서는 설치방법에 따른 조인트 강도 및 Leak Tightness, PWSCC에 대한 저항성, 설치 공정 변수 범위에 대한 평가, 장치와 절차가 보수 계획 및 방사선 피폭에 미치는 영향, 용가재 사용시 앞에서 언급한 조건을 만족하는지에 대한 검토가 필수적이다.

ABB CE사는 14기 이상의 발전소에 14000개 이상의 슬리브를 설치하였다. 보유하고 있는 보수기술은 주로 TIG Welding을 이용하여 기밀을 유지하며, 관판부에 Straight Tubesheet Sleeve, 가장자리에 위치한 전열관에 Peripheral Tubesheet Sleeve, 관지지판에 Tube Support Sleeve, 관판 및 관지지판에 PLUSS Sleeve의 방법을 사용하고 있으며, 최근에 Nd:YAG 레이저를 이용한 Direct Tube Repair 기술을 개발하였다. FTI는 21기 이상의 발전소에 10000개 이상의 슬리브를 설치하였다. 재순환형 증기발생기의 관판 및 관지지판에 Brazed Sleeve가 사용되며, 일체형 증기발생기의 상하부 관판, 관지지판, Upper Span에 Hydraulic, Rolled, Mini Sleeve가 사용된다. 최근에 개발된 Electrosleeving 기술은 슬리브를 삽입하는 기존 보수 방식의 단점인 가공유기응력과 열응력에 의한 잔류응력형성으로 SCC 발생 가능성과, 냉각수 유속 감소 및 열전달 효율 감소를 최소화할 수 있어 차세대 보수기술로 각광 받고 있다. Westinghouse사는 17기 이상의 발전소에 59000개 이상의 슬리브를 설치하였다. 슬리브 기술로는 PWSCC 민감성이 낮은 전열관에 적용되는 HEJ와 PWSCC 민감성이 높은 전열관에 적용되는 Laser Welded Sleeve의 2 가지가 있다. 과거에는 Brazed Sleeve가 사용되기도 하였으나 지금은 사용되지 않고 있으며, ABB사와 마찬가지로 최근에 Laser를 이용하여 Tube Direct Repair 기술을 개발하

였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구결과, 슬리빙을 통하여 열화된 증기발생기 전열관을 보수함으로써 효과적인 증기발생기의 수명연장을 기대할 수 있음을 확인하였으며, 전열관 보수기술의 자격요건과 보수기술을 제공하고 있는 ABB CE, FTI, Westinghouse사의 슬리브 기술 및 특성을 분석하여, 향후 국내 보수기술의 연구 방향과 방안을 제시하였다. 또한 본 연구 결과는 국내 원자력 발전소의 전열관 보수시 검토자료로 활용될 것이며, SCC를 유발하는 잔류응력을 최소화하기 위해 전기도금을 이용, 슬리브를 삽입하지 않는 Electrosleeving기술에 대한 특허 분석은 이에 대한 국내 기술개발의 기초자료로 이용될 것이다.

SUMMARY

I. Project Title

Repair Technology for Steam Generator Tubes

II. Objective and Importance of the Project

There are 18 nuclear plants under operation in domestic country. Repair of steam generator tubes have taken long time, costed lots of money since they have been performed by the foreign companies. Possibility of tube leak from primary side to secondary side at steam generator is very high, and tubes which have those possibility during operation are plugged. But if plugging ratio is higher than plugging limit, steam generator needs to be replaced. Replacement of steam generator cost about tens of billion dollars and causes lots of damage and contamination by radiation. In addition, Foreign companies tend to request higher repair expense if no domestic research and development on repair techniques is performed.

III. Scope and Contents of the Project

In this study, technical documents were reviewed and summarized to cover the sleeve materials, dimension, installation methods and qualification for the requirements of steam generator repair techniques.

Inconel 600, 690 and Incoloy 800 as the sleeve materials and the experimental method to determine the residual stress due to the sleeve expansion and sealing techniques and verification issues to satisfy the qualification requirement of repair technology were analysed in detail.

The current repair techniques of steam generator tubing for ABB CE, FTI and Westinghouse which are the typical sleeving vendors were investigated. ABB CE provides three type of leak tight Alloy 690 TIG welded and PLUSS sleeve. FTI has brazed and kinetic sleeve designs for recirculating steam generator and hydraulic and rolled sleeve designs for one-through steam

generators. And furthermore FTI provides electrosleeve design using electroforming. Westinghouse provides HEJ, brazed and laser welded sleeve design. Presently no brazed sleeves are installed in an operating plant.

IV. Results of the Project

The most commonly used sleeving materials until are thermally treated Alloy 600 and thermally treated Alloy 690 Alloy. Currently, thermally treated Alloy 690 which has good resistance of PWSCC are being offered. Sleeve length of laser welded sleeve is 150mm. The FTI electrosleeve offer sleeve to be less than 200mm in length and The ABB CE and Westinghouse laser welded direct tube sleeve offer 26mm sleeve. Sleeve thickness should be less than the wall thickness and the radial clearance is 0.30~0.46mm and the smaller clearance is better in order to reach the repair position without objection. Expansion and sealing method of sleeve affect residual tensile stress in joint. The highest residual stress is made by roll expansion and the lowest residual stress is made by hydraulic expansion. To install sleeve, joint strength, leak tightness, PWSCC resistance, evaluation on process parameter range and the effect of equipments and procedures on repair plan and radiation damage have to be investigated before sleeving.

ABB CE installed over 14000 sleeves at 14 nuclear plants. ABB CE provides PLUSS sleeve and three type of leak tight Alloy 690 TIG welded which are straight tubesheet sleeve, peripheral tubesheet sleeve and tube support plate sleeve. Currently, Direct Tube Repair technique using Nd:YAG laser has been developed.

FTI installed over 10000 sleeves at 21 nuclear plants. FTI has a number of sleeve designs for both recirculating and one-through steam generators. The FTI sleeve designs are Brazed, Hydraulic expanded, Roller expanded, Kinetic sleeve. The sleeves are used for 1) the tubesheet region of recirculating steam generators, 2) the tube support plate regions of recirculating steam generators, 3) the tubesheet and upper span of one-through steam generators, 4) the tube support plate region of one-through steam generators.

The FTI electrosleeve is a structural repair for steam generator tubing. The

electrosleeve process provides a continuous bond of high-strength micro-alloyed nickel to the parent tube internal diameter, spanning the defective region. Since no deformation of the parent tube occurs, stress relief is not required.

Since 1980, Westinghouse has installed over 59,000 sleeves in the steam generator at 17 nuclear plants. Westinghouse provides HEJ, brazed and laser welded sleeve design. Presently no brazed sleeves are installed in an operating plant.

ABB CE and Westinghouse has developed a Laser Welded Direct Tube Repair process for restoring degraded steam generator tubing.

V. Proposed Application of the Results

As a results of this report, designs and characteristics on repair techniques of steam generator tubes which have been provided by ABB CE, FTI and Westinghouse were investigated, direction of research and development on repair techniques of steam generator tubes was suggested. This report will be used to as a guide line of sleeving of domestic steam generator tubes. Analysis on electorsleeve patent published by FTI will be a baseline data of electrosleeve using electroplating which minimize the residual stress to cause SCC.

목 차

제 1 장 서론	1
제 2 장 증기발생기 전열관 결함과 보수법	3
제 1 절 결함 발생 기구	3
제 2 절 보수시 고려 항목	7
1.플러깅 한계	7
2.슬리빙 자격 요건	7
3.전열관의 PWSCC 민감성	7
4.열화위치에 따른 보수 위치	9
5.열화정도 및 속도	9
6.조인트부에서 모재의 건전성	10
제 3 장 슬리브 설계 요건	11
제 1 절 슬리브 재료 및 치수	11
1.슬리브 설계 요건	11
2.슬리브 치수	11
3.전열관, 슬리브, 용가재 재료	15
제 2 절 슬리브 설치	17
1.전열관/슬리브 확관 및 기밀 방법	17
2.잔류응력 제거열처리	21
제 3 절 자격 요건	22
1.자격 시험	22
2.분석검증	26
3.검사	27
4.검사방법	30
5.미국원자력위원회의 검사규제지침 개정방향	32
제 4 장 증기발생기 전열관 보수기술 현황	34
제 1 절 보수 업체 및 기술 현황	34
1.ABB CE	34
2.FTI	39
3.Westinghouse	46
제 2 절 보수 기술	52
1.기계식 슬리빙	52
2.브레이즈 슬리빙	52

3.폭발 용접 슬리빙	54
4.레이저 용접 슬리빙	58
5.PLUSS 슬리빙	60
6.일렉트로슬리빙	66
제 3 절 현장 경험	77
1.Doel 4 발전소	77
2.Kewaunee 발전소	78
제 5 장 결 론	79
제 6 장 참고문헌	81

Contents

Chapter.1 Introduction	1
Chapter.2 Study of Defects and Repair Techniques of Steam Generator Tubes.	3
1. Defect Mechanisms	3
2. Sleeve Qualification Consideration	7
1) Plugging Margin	7
2) Licensing Consideration	7
3) PWSCC Sensibility of Tubes	7
4) Sleeve Installation Location as a function Degradation Location. ...	9
5) Degradation Extent and Rate	9
6) Integrity of Original Tube at Joint Locations	10
Chapter.3 Sleeve Design Consideration	11
1. Sleeve Materials and Dimension	11
1) Sleeve Design Consideration	11
2) Sleeve Dimension	11
3) Tubes, Sleeve, Filler Metal	15
2. Sleeve Installation	17
1) Tubes/Sleeve Expansion and Sealing Method	17
2) Post Heat Treatment	21
3. Licensing Consideration	22
1) Qualification Testing	22
2) Analytical Verification	26
3) Inspection	27
4) Inspection Method	30
5) The Revision Direction in the Inspection Regulation Guide of the US Atomic Agency Commission	32
Chapter.4 Status of Repair Techniques for S/G Tubes	34
1. Repair Companies of S/G Tubes	34
1) ABB CE	34
2) FTI(Framatome Technology Incorporate)	39
3) Westinghouse	46
2. Repair Techniques	52

1) Hydraulic expansion joining	52
2) Brazed sleeving	52
3) Explosive Welded Sleeving	54
4) Laser welded sleeving	58
5) PLUSS sleeving	60
6) Electrosleeving	66
3. Field Experience	77
1) Doel 4	77
2) Kewaunee	78
Chapter.5 Conclusions	79
Chapter.6 References	81

List of Tables

Table 2-1 Sleeving Experience.	9
Table 3-1 Typical Length of Sleeve.	13
Table 3-2 Sleeve Wall Thickness as a function of Sleeve Materials.	14
Table 3-3 The Chronology of Fabrication and Annealing Conditions.	15
Table 3-4 Comparison of Candidate Materials for S/G tube.	16
Table 3-5 Expansion Method and PWSCC Experienced.	18
Table 3-6 Test Results of Elevated Temp. Steam Tests.	24
Table 3-7 Classification of Accelerated Tests.	25
Table 3-8 Comparison of Steam Generator Tubes Inspection Method.	31
Table 4-1 Weld Joint Design and Influencing Parameter.	58
Table 4-2 Installed PLUSS Sleeves.	64
Table 4-3 Efficiency, Length, Applicable Area and Sleeves/Plug Ratio as a function of S/G Tube Repair Techniques.	65
Table 4-4 Advantage and Feature of Electrosleeving.	69
Table 4-5 Mechanical Properties.	70
Table 4-6 Process Parameter and Solution of Electroforming.	75

List of Figures

Fig.2-1 Defects and Defect Location in S/G tubes.	6
Fig.2-2 Power Reduction as a function of a Number of Tubes Plugged.	8
Fig.3-1 Required Sleeve Length as a function of Location.	12
Fig.3-2 Residual Stress vs Time-to-crack Curves.	19
Fig.3-3 Inspection Locations and Bobbin Coil Sensitivity Reported by B&W.	29
Fig.4-1 ABB CE TIG Welded Straight Tubesheet Sleeve Installation.	36
Fig.4-2 ABB CE Peripheral Tubesheet Sleeve Installation.	37
Fig.4-3 ABB CE Tube Support Plate Sleeve Installation.	38
Fig.4-4 Recirculating S/G Brazed Sleeve.	41
Fig.4-5 OTSG Hydraulic Sleeve.	42
Fig.4-6 OTSG Rolled Sleeve.	43
Fig.4-7 FTI Mini Sleeve.	44
Fig.4-8 FTI Kinetic Tubesheet and Tube Support Plate Sleeve.	45
Fig.4-9 Westinghouse Hybrid Expansion(HEJ) Sleeve Installation.	48
Fig.4-10 Westinghouse Laser Welded Tubesheet Sleeve Installation.	49
Fig.4-11 Westinghouse Laser Welded Elevated Tubesheet Sleeve Installation.	50
Fig.4-12 Westinghouse Laser Welded Tube Support Plate Sleeve Installation	51
Fig.4-14 Mechanism of the Explosive Welding; (a)The Basic Setup before the Explosive is detonated, (b)The Position When the Detonation Front, Which Travels at Velocity VD, has reached B and the Collision Point has reached S.	55
Fig.4-15 Boundaries for Explosive Welding.	56
Fig.4-16 Explosive Welded Sleeve; (a)Tubesheet, (b)Tube Support Plate, (c)Others Degraded Position.	57
Fig.4-17 Laser weld head for repair of steam generator tube.	59
Fig.4-18 Stress/strain diagram of sleeve and tube.	61
Fig.4-19 PLUSS sleeve (a) TS (b) TSP.	62
Fig.4-20 Temperature investigation unsleeved/sleeve tube.	63
Fig.4-21 Advantage of electrosleeving using electroforming.	68
Fig.4-22 Effect of annealing time at 343°C on the Vickers hardness of both microalloyed and non-alloyed nano-Ni.	72
Fig.4-23 Cross section of a tube-electrosleeve following a SCC test. IGSCC is prevalent on the alloy 600 tube and stops at the interface.	73
Fig.4-24 Electroforming Probe developed by Ontario Hydro Technology.	76

제 1 장 서론

현대 산업사회의 구조가 보다 복잡하게 발전함에 따라 전력수요의 대폭적인 증가와 함께 보다 양질의 전력을 안정되고 충분하게 공급받고자 하는 수요자의 요구가 증대되고 있다. 따라서 안정된 전력공급을 위해서 전력생산에 대한 신뢰성 향상 및 안정성 확보는 물론 고효율 운전이 절실히 요청되어지고 있다.

이러한 의미에서 원자력 발전이 국가에 이바지하는 정도는 매우 크다 할 수 있으며 그 국가적 중요성을 고려할 때 안전하며 경제적인 전력공급을 안정적으로 확보하기 위해 원자력발전소의 효율적 유지관리가 요구되어진다. 따라서 원자력발전소 유지관리작업 중에서 중요한 위치를 차지하고 있는 증기발생기의 유지보수작업을 보다 신뢰성 있게 할 필요가 대두되고 있다.

원자력발전소 내부의 증기발생기는 원자로에서 발생된 에너지를 방사능에 오염된 1차 냉각계통의 고온, 고압의 냉각재를 통하여 방사능에 오염되지 않은 2차 냉각계통(터빈계통)으로 전달하는 중요한 구성요소이다. 따라서 증기발생기 내부에 누수가 발생하여 1차 계통의 냉각재와 2차 계통의 급수가 섞이게 되면 2차 계통에 심각한 방사능오염을 유발시킬 수 있다. 이러한 이유로 원자력발전소 증기발생기의 검사 및 유지, 보수작업은 대단히 중요한 작업의 하나이다.

현재 국내에 가동중인 원자력발전소 증기발생기 보수를 위하여 그 동안 외국의 전문기관에 용역을 실시해 왔으나 그 비용이 막대하고 보수기술이 축적되지 않아 향후에도 계속 외국에 의존하여야 하며, 긴급 상황시 자체 기술에 의한 조치가 어려운 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 국내기술개발의 필요성이 절실하게 요구된다.

증기발생기 전열관 열화 원인으로는 1, 2차측 모두 SCC가 대부분을 차지하고 있으며 그 외 피팅, 마모 등이 있다. 이러한 증기발생기 손상을 보수하기 위하여 손상된 전열관 내부에 슬리브관을 삽입한 후 모재와 슬리브관을 연결하는 방법을 사용하고 있는데 연결방법에 따라 기계식, 용접식등 여러 가지 보수법이 사용되어지고 있다¹⁾²⁾³⁾⁴⁾. 그러나 슬리브관을 삽입하여 보수하는 방법들은 모두 모재와 조인트부를 필요로 하게 되므로 연결부 제작시 인입되는 가공유기응력이 결합발생의 잠재요인으로 작용하여 설치 후 결함을 유발하게된다. 따라서 조인트부가 없는 일체형의 Electrosleeving법은 기존의 이러한 단점을 보완할 수 있으며 그밖에도 차기보수를 위한 접근성 양호, 모재의 미세조직 불변, 틈새 없는 연속적 결합, 냉각재 유속 감소 최소, 잔류응력제거 및 슬리브관 삽입 불필요, 기계적

강도 우수 등의 장점이 있어 차세대 보수법으로 대두되고 있다. Electrosleeving을 적용할 수 있는 전열관은 1)PWSCC에 대한 민감성이 높고, 플러깅 기준 미초과 전열관 2)균열이 플러깅 기준을 초과하고 정상적인 플러깅 한계를 넘는 축방향 결함을 갖는 Licensing Position 전열관등이다.

본 보고서의 목적은 1)슬리브 설계 요건에 대한 토의 2)현재 사용중인 보수 방법 검토 3)국내보수기술의 연구방향제시 등이다.

제 2 장 증기발생기 전열관 결함과 보수법

제 1 절 결함 발생 기구

증기발생기 전열관은 1972년이래 여러 종류의 손상을 경험하였다⁵⁾. 지난 10년 동안 증기발생기 전열관의 보수가 요구되었던 원전은 전 세계적으로 평균 52%이었으며, 1998년에는 230개 원전들 중 45%가 증기발생기 전열관의 보수를 수행하였다. 그 중 보수된 전열관의 백분율은 0.49%이었으며 열화된 증기발생기 교체가 증가함에 따라 최근 3년 동안은 감소 추세를 보이고 있다.

증기발생기 전열관 손상에 의한 보수의 원인으로는 70년대 초기에는 Wastage에 의한 Thinning이 주요 손상 원인이었으나, 수질화학의 개선 등으로 70년대 중반 이후는 Thinning에 의한 손상 확률은 줄어들었다. 반면에 1977년 초 80% 이상의 결함이 덴팅(Denting)에 의한 것이었고 이 결함은 1982년에 4%로 감소하였으나 그 후 ODS(Outer Diameter Stress Corrosion Cracking), PWSCC(Primary Water Stress Corrosion Cracking), Pitting, Wear 등이 주요 손상원인으로 나타났다. 1998년도 조사된 전세계 증기발생기 전열관 보수의 주원인으로는 PWSCC(16%), ODS(49%), Wear(11%)이었다. Fig.2-1은 S/G 전열관의 손상 위치 및 원인을 나타내고 있다.

각 결함에 대한 원인과 대책은 다음과 같다.

Thinning and Wastage : 초기에 주로 발생한 손상으로서 이차계수처리와 관련하여 첨가한 인산나트륨 완충재에 기인한 것으로 관지지판 사이의 틈새와 관 위 퇴적한 sludge에 인산염이 농축되어 국부적인 Thinning 현상이 발생하였다. 따라서 그 대책으로 AVT를 채택하는 등 이차측 냉각수의 환경개선으로 방지하고 있다.

SCC : SCC는 일차측에서 발생하는 PWSCC(Primary Water Stress Corrosion Cracking)와 이차측에서 발생하는 ODS(Outer Diameter SCC)를 대별된다. PWSCC는 잔류응력과 부하응력이 큰 전열관의 환관부위 혹은 U-bend 부위에서 주로 발생한다. ODS는 관과 관판사이의 간극과 관지지판 부근에서 주로 일어나며, 인산염에서 분리된 알카리 혹은 sludge의 가수분해에 의한 알카리의 국부적인 농축에 기인한 손상이다. PWSCC를 방지하기 위한 대책으로 I600 TT 또는 I690 TT 등의 재료를 사용한 재료개선방법을 채택하고 있다. ODS를 방지하

기 위한 대책으로는 이차계 수질개선과 재질개선, 전열관 지지부 형상설계 변경 등을 채택하고 있다.

Denting : Denting은 탄소강의 관지지판을 사용한 경우 전열관과의 사이에 마그네사이트 등의 부식산물이 생겨 관지지판과 전열관을 변형시키는 현상이다. Denting 부위의 관내면에 응력이 발생하여 IGSCC에 의한 손상이 생긴다. 방지 대책으로 이차계 수질개선과 관지지법의 설계개량, 재질개선 등의 방법을 채택하고 있다.

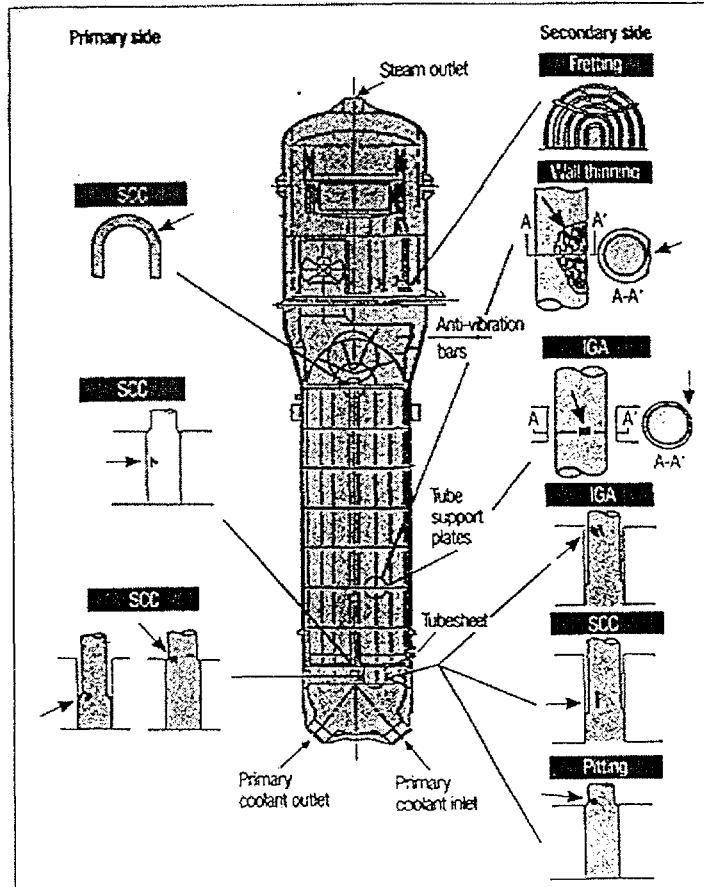
IGA : IGA에는 입계가 균일하게 일정한 깊이로 Pitting되는 경우와, 부분적으로 깊이가 깊은 "Finger"라 불리는 Pitting가지를 갖는 경우로 대별된다. 주요 발생 위치는 이차측의 전열관과 관판 사이와 전열관과 관지지판 사이의 Sludge 퇴적부이다. IGA의 발생은 일반적으로 급수중의 불순물과 복수기 누수에 의한 염수 등의 농축에 기인한 알카리성 분위기에 원인이 있으며, 알카리 농도, 온도, 산화제, 응력의 존재 등에 그 감수성의 차이를 보인다. 방지대책으로 이차측 수질개선, 재질개선, 설계변경 등을 채택하고 있다.

Pitting : Pitting은 국부 부식의 한 형태로 전열관 두께 방향으로 작고 긴 원형의 부식을 일으키는 전열관 손상기구로 널리 알려져 있다. 하지만 Pitting의 기본 기구는 완전히 알려져 있지 않다. 증기발생기에서의 Pitting은 일반적으로 저온 관부의 Sludge 파일부나 위쪽에서 발생되며 산성의 염소이온이나 황산염 분위기에서 생성되는 것으로 이들 불순물은 복수기 누설이나 탈염기로부터 공급된다. 이때 산화구리와 용존산소와 같은 산화성 분위기가 첨가되는 경우 Pitting은 더욱 발달하게 된다. Pitting은 자기촉매적인 반응을 보이는 부식이다. 다시말하면 Pit내의 부식반응이 Pit의 활성화를 일으키는 방향으로 진행된다는 것이다. 즉, Pit의 내부로 이동되어 농축된 염소이온은 불을 분해시키고 OH 이온을 금속이온과 반응시켜 제거하고 남겨진 수소이온을 축적시킴으로써 Pit의 분위기는 높은 산도를 유지하며 계속적인 부식분위기를 유지하도록 한다⁶⁾.

Fatigue : 피로기구로는 고주기 피로 및 저주기 피로가 있다. 고주기 피로는 주로 웨스팅하우스 S/G 모델 51 및 44의 U-bend 위치에서 발생하였으며, 발생된 균열 형태는 원주방향 균열로 완전절단 또는 상당히 큰 원주 각도의 결함이 있었다. 또한, 저주기 피로는 S/G 운전후 약 10년 정도에서 발생하기 시작하며 균열이 발생하면 바로 세관의 양단파열로 직결될 수 있는 급속한 결함 성장 특성을 가지고 일차냉각수의 대량 누설 가능성을 가진다.

Fretting : 셀-전열관형 열교환기내에 있는 전열관들은 전열관 중간에 전열관

지지대에 의하여 지지되고 있다. 이 전열관 지지대 사이에는 열팽창과 제작상의 어려움을 고려하여 어느 정도 틈새를 허용하고 있으며 이로 인하여 세관과 지지대 그리고 전열관과 이웃한 전열관 사이에는 유동유발진동에 의한 충돌과 마찰이 존재하게 되어 Fretting 마모를 일으키게 된다.



▲ The wide range of tube degradation mechanisms experienced in steam generators in Japan.

Fig.2-1 Defects and Defect Location in S/G tubes.

제 2 절 보수시 고려 항목

전열관 보수는 다음과 같은 순서에 의거한다. 1)플러깅 한계를 고려하여 플러깅을 설치(제거 가능)하며, 2)플러깅 한계에 도달하였을 때, 결함의 정도와 진행 속도가 증기발생기를 교체할 하지 않아도 될 때에 슬리빙을 한다. 마지막으로 방법으로 3)증기발생기를 교체한다.

1.플러깅 한계

플러깅은 슬리빙에 비해 저렴하고, 안전하므로 주로 사용되나, Fig.2-2에서 알 수 있는 바와 같이 플러깅 비율이 여유도를 초과할 경우 급격한 열출력 감소로 경제성의 한계에 부딪히게 되므로 이에 대한 고려가 필수적이다. 플러깅 설치시의 고려 사항은 다음과 같다. 1)발전소의 플러깅 한계가 높고, 열화속도는 낮으며, 2)기존에 설치된 슬리빙 고도보다 열화위치가 높은 경우와, 3)유효 슬리빙이 불가능한 경우 플러그를 설치한다.

2.슬리빙 자격 요건

· 한번 슬리빙하면 타방법으로 슬리빙하는 것이 불가능하므로 안전성 및 건전성 등에 대한 시험완료 후, 이에 합격한 슬리빙 방법을 사용하여 보수하여야 한다. 보통의 경우는 제거 가능한 플러깅을 설치한 후에 슬리빙하는 것이 바람직하다. 예외에 해당하는 경우는 1)평가를 목적으로 한 소량의 슬리빙(이 경우에도 고온에서 장기간에 걸친 PWSCC시험을 제외한 모든 시험에 통과한 방법) 2) 플러깅 한계에 도달한 상황에 있는 경우이다. 이 때에는 반드시 일반적으로 사용되고 있는 유효 슬리빙 방법을 사용하여야 한다.

3.전열관의 PWSCC 민감성

모재가 PWSCC에 대해 민감하다면 조인트부의 인장잔류응력을 PWSCC 유발 임계응력보다 낮게 유지하여야 한다. 과거의 슬리빙은 결함발생율이 극히 낮았는데 이는 발전소의 운전온도가 낮았고, 전열관의 Mill Annealing 온도가 높은 결과로 모재의 PWSCC 민감성이 낮았기 때문이다.

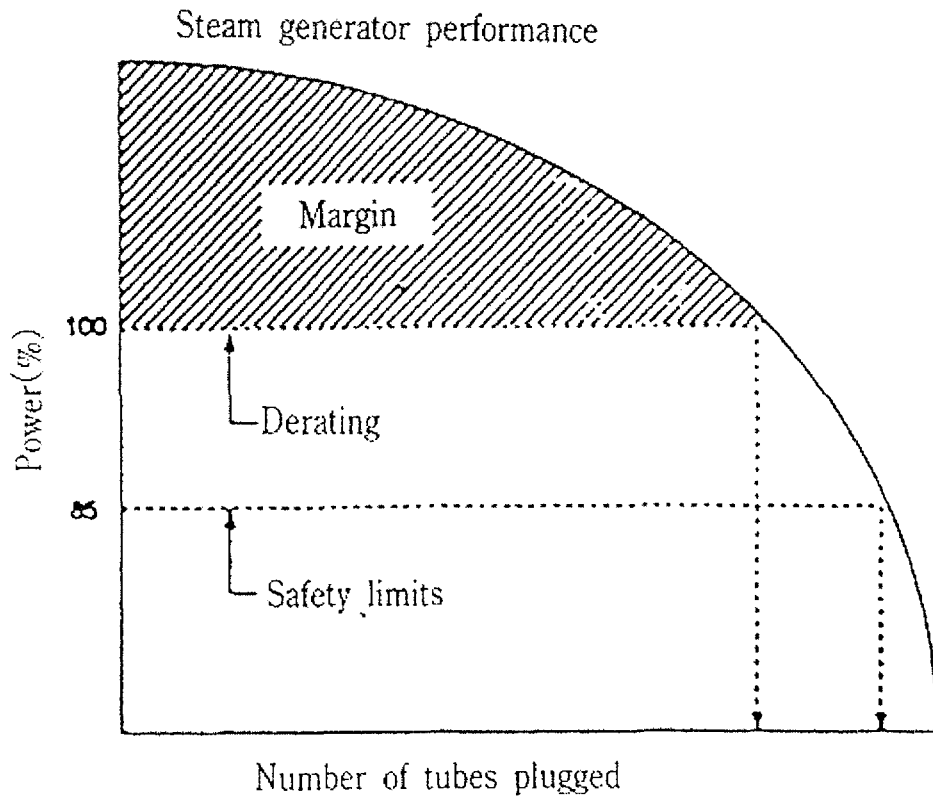


Fig.2-2 Power Reduction as a function of a Number of Tubes Plugged.

4.열화위치(Degradation Location)에 따른 보수 위치

관관부근에서 대부분의 결함이 발생하는데, 이 부분을 보수하기 위한 슬리빙 위치를 세 가지로 분류하면 1)관관 밑바닥에서부터 슬리지파일 윗부분 까지 2)관관 전체 3)관관의 중앙부로 나눌 수 있다. 과거에는 관관과 수실사이의 청정도가 우수하였으므로 관관 중앙부만 슬리빙 하였으나 2차측 결함이 심각한 경우도 있으므로 현재에는 관관 밑바닥부터 슬리지파일 윗부분까지 하는 것이 일반적이다.

그리고, 소량의 결함이 관지지관 부근에서 발생한다. 관관 보다 관지지관을 슬리빙하는 것이 더 어렵다. 그 이유는 1)길이가 긴 기구 필요하며, 2)좀 더 긴 길이를 통과하여야 되고, 3)Denting에 의한 전열관과 관지지관사이의 상호작용으로 형상학적으로 불균일하며, 4)기존의 관관 슬리빙의 방해와 5)슬리빙하고자 하는 위치보다 낮은 위치에 기슬리브가 존재하기 때문이다. 이러한 이유로 관지지관에 슬리브 설치가 곤란한 경우가 많다.

5.열화정도 및 속도(Degradation Extent and Rate)

Table 2-1 Sleeving Experience.

Plant	Date	Sleeve Installed	Sleeve reason	Freespan Joints	Tube Sheet Joints	Total Time(weeks)
San Onofre 1	1980-1981	6929	TS Crevice IGA	HE + B or R	HE + R	30
Kewaunee	1988-1989	3638	TS Crevice IGA IGSCC	HE + R	HE + R	4.5

Table 2-1에서 알 수 있듯이 보수세관 수에서는 San Onofre 1가 Kewaunee 보다 약 두 배정도 많지만 보수기간에서는 여섯 배정도로 훨씬 오랜 걸린 것을 알 수 있다. 이것은 슬리빙 방법에 대한 기술의 진보에 기인한다. 이와 같이 대량 슬리빙은 시간과 비용면에서 너무 많은 부담이 요구되며, 업자와 고객간에 철저한 계획이 필요하다. 따라서 슬리빙 전열관 수량을 줄이고, 비용을 절감하기

위해서는 슬리빙에 앞서 전열관의 열화정도 및 예상 열화속도에 대한 평가가 필수적이라고 할 수 있다.

6.조인트에서 모재의 건전성(Integrity of Original Tube at Joint Locations)

조인트는 모재의 건전성이 확보된 부분에서 이루어져야 한다. 결함이 확장될 가능성이 있는 부분에서 조인트 형성은 곤란하다. 왜냐하면, 조인트 제작시 인입되는 가공응력 또는 열응력에 의해서 유도된 인장응력이 결함의 진행속도를 증가시킬 우려가 있기 때문이다. 따라서 관판 상부(Freespan)와 모재의 확장부(Expansion Transition Zone)를 피해서 조인트를 제작하는 것이 바람직하다.

제 3 장 슬리브 설계 요건

제 1 절 슬리브 재료 및 치수

1. 슬리브 설계 요건

슬리브 및 조인트부가 갖추어야 할 요건은 다음과 같다. 1)모재의 구조적 열화를 보충하기 위한 적절한 강도 2)잔류수명을 유지하기 위한 내식성 3)누설 차단 4)ALARA 요건 등을 만족하여야 한다.

가.강도(Strength) : 열화현상으로 전열관은 초기두께보다 매우 얇은 상태이므로 모재의 강도를 제로라고 가정하여, 슬리브의 구조적 강도가 필요하게 된다. 그러나, 결함종류가 Pitting이거나, 모재의 구조적 건전성을 약화시키지 않는 충분히 작고 고립된 균열의 경우는 이에서 제외된다.

나.내식성(Corrosion Resistance) : 슬리브는 모재의 열화원인이 PWSCC가 아니더라도 이에 대한 저항성이 우수해야한다. 조인트 제작에서 새롭게 형성된 미세조직 또는 브레이즈 슬리빙시 사용되는 용가재(Filler Metal)는 보수를 요하는 모재의 결함에 대하여 저항성을 갖고 있어야 하며, 잔류응력 형성은 없어야한다.

다.누설차단(Leak Tightness) : 기밀의 우수성은 관관 상하부 조인트 제작시 브레이징, 용접, Hard Rolling에 의해서 얻어질 수 있다. 누설현상은 기계식 팽창 후 Hard Rolling한 조인트에서 발생할 가능성이 농후하다. 누설량은 약 0.5cc/min이며, 오염물 및 방사능 유출 가능성이 있다.

2. 슬리브 치수

가.슬리브 길이(Sleeve Length) : 슬리브길이에 영향을 주는 슬리브 설치 위치 인자가 Fig.3-1에 잘 나타나 있다. 슬리브 길이에 제한을 주는 인자는 관관 하부에서 수실상부까지의 거리이다. 따라서, 중앙부에서 슬리브 길이는 36-45inch이나 가장자리에서의 슬리브 길이는 11-12inch로 짧아지게 된다. 조인트를 통한 균열의 전파 방지를 위해서 조인트는 모재의 열화현상이 없는 곳에 위치해야 해야 하며, 제거가 용이해야 한다. 조인트에 원주형 균열의 발생시는 그 상단에 조인트를 제작함으로써 재보수를 목적으로 슬리브 끝보다 충분히 아래쪽에 조인트를

제작한다.

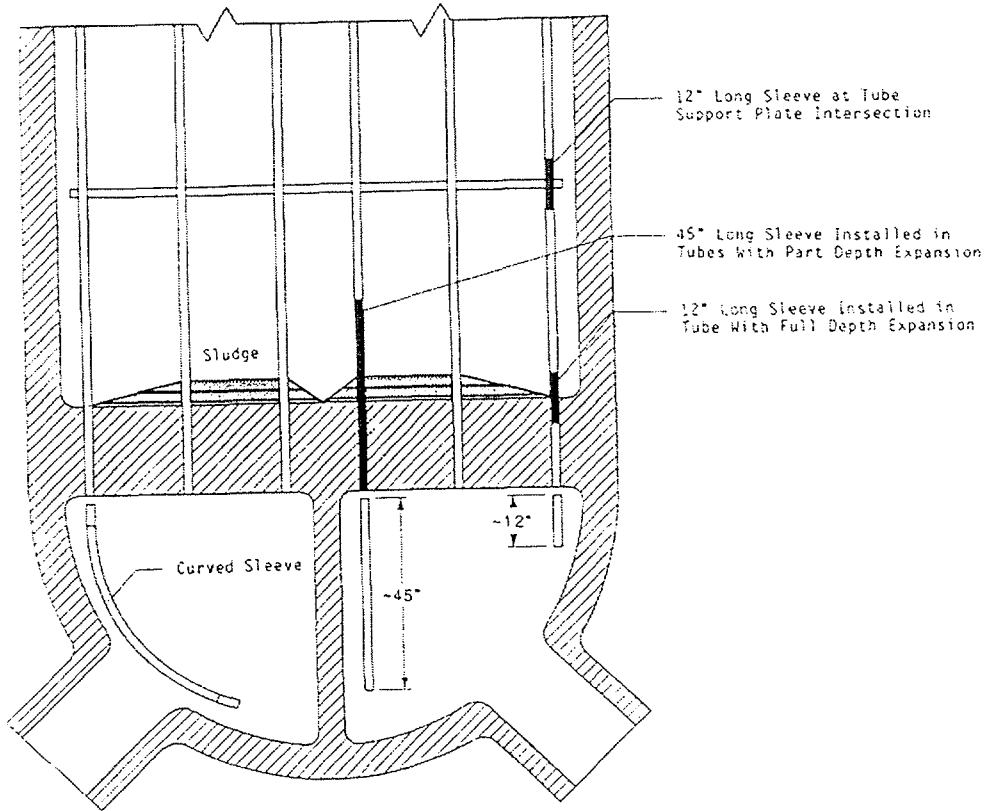


Fig.3-1 Required Sleeve Length as a function of Location.

Table 3-1 Typical length of sleeve.

Location	Length of Sleeve(mm)
Part depth expansion	660.4-1143
Full depth expansion	304.8-1143
TSP	254-279.4
TS(Periphery)	279.4-304.8

Table 3-1은 전형적인 슬리브 길이를 나타내고 있다. 관판에서의 슬리브 길이는 확관부 위치와 Sludge 높이에 의해 변화한다. 관판 하부 조인트는 관판 변형에 의한 비틀림을 유발할 가능성이 높다. 부분 확관(Part Depth Expansion)은 관판 하부에서 2-4inch(50-100mm)상단에 위치하며, 전장 확관(Full Depth Expansion)은 관판 상부에 가까운 부근에 위치한다. 관판 상부 조인트는 2차측 결합으로부터 보호하고, Sludge 열전도도에 의한 접합 등 문제를 차단하기 위해 Sludge 높이보다 높은 위치에 제작한다. Sludge 높이는 보통 150mm이하이나 극단적인 경우 460mm의 높이까지 쌓이기도 한다⁷⁾. 슬리브 끝부분은 Sludge 보다 5inch(127mm)정도 높게 설치한다.

관지지판에서 슬리브의 적정 길이는 250-280mm이다. 조인트 길이가 상하부 각각 50mm, Backup Joint의 길이가 각각 50mm이 된다. 슬리브 최소길이는 150-180mm이며, 최대길이는 중앙부와 가장자리에서 각각 910-1140mm, 280-300mm이다. 가장자리에서 슬리브 길이를 증가시키기 위한 도구를 개발 연구 중에 있다. 예를 들면, Flexible Sleeve와 Segmented Sleeve가 있다. Flexible Sleeve는 양쪽 끝 부분이 짧고 직선적이나, 가운데 부분은 유연하여 가장자리에도 1520-2030mm까지의 슬리브 길이가 가능하다. Segmented Sleeve는 짧은 두 슬리브를 삽입한 후 Butt 용접을 실시한다.

나.슬리브 직경과 반경차이(Sleeve Outside Diameter and Radial Clearance) : 슬리브 직경은 모재의 내경과 모재/슬리브간의 반경 차이에 의해 결정된다. 반경 차이가 클 경우에는 관지지판에 Denting이 존재하더라도 원하는 위치에 슬리브

장착이 가능하다. 반경 차이가 작을 경우에는 조인트 제작시 슬리브의 확관량이 작으므로 SCC 가능성이 상대적으로 낮아지게 된다. 따라서 원하는 위치에 도달하는데 방해받지 않는 한 반경차이(Radial Clearance, Some Vender : 0.30-0.46mm)는 작을수록 좋다⁸⁾⁹⁾.

다.슬리브 벽 두께(Sleeve Wall Thickness) : 슬리브 벽 두께는 다음과 같은 가정 하에 결정하게된다. 가정 1)모재는 구조적 건전성을 완전히 상실하였으며, 2)결합이 전열관의 전 두께에 침투하였다. 전열관이 가진 구조적 건전성을 확보하기 위해서는 결국 초기의 전열관 두께와 비슷하여야 한다. 최소 두께 이상일 경우에 구조적 강도는 증가하나 조인트 제작시 어려움이 많이 따르고 유속감소가 증가하는 불이익을 초래한다. 슬리브 최소 두께는 전열관 벽두께보다 약간 작아야 한다. 그 이유는 1)슬리브 직경이 전열관 직경보다 작으므로 내부압력을 유지하기 위한 두께는 전열관에 비해 작아도 충분히 유지가 가능하며 2)강도에서 슬리브 재료가 훨씬 우수하고 3)슬리브 두께가 인가된 하중보다 관관 회전에 의존하기 때문이다. Table 3-2는 ASME Sec. II, Part D, Subpart 1, Table 2A&2B 에 있는 슬리브 두께를 나타내고 있다. 슬리브 최소 두께는 ASME Sec. III, Div. 1, NB-3324.1에 나와있는 아래의 식 (1)에 의해 계산할 수 있다.

$$t = \frac{P \cdot R}{S_m - 0.5P} \quad \text{or} \quad t = \frac{P \cdot R_0}{S_m + 0.5P} \quad (1)$$

여기서 t는 슬리브 벽 최소 두께, P는 설계압력(170bar), S_m은 설계강도를 나타낸다.

Table 3-2 Sleeve Wall Thickness as a function of Sleeve Materials.

Material	Inconel 600	Inconel 690	Incoloy 800
Design Stress Intensity(S _m)	23.3ksi	23.3ksi	20.0ksi
Thickness			
5/8" for 3/4" Tube	0.798mm	0.798mm	0.922mm
3/4" for 7/8" Tube	0.957mm	0.957mm	1.106mm

3. 전열관, 슬리브, 용가재 재료

가. 전열관(Original Tubing Material) : 슬리브와 조인트부에서 잔류응력 형성 용이성에 대한 검토가 있어야 한다. 전열관 재료로 사용되는 Inconel600(이하 I600)은 제조공정에 따라 I600 MA, I600 TT, I600 HTMA, I690 TT¹⁰⁾ 등으로 명명되고 있다. Table 3-3에 전열관의 제조 연대기와 열처리 조건이 나타나 있다¹¹⁾. 낮은 용체화 처리 온도(LTMA)에서 SCC에 대한 저항성이 낮은 것으로 발견되었다. ABB-CE에서는 I600의 탄화물 분포가 SCC 민감도에 큰 영향을 미치게 되므로 소둔 온도를 조절함으로써 SCC 저항성이 높은 탄화물 분포를 갖게 하는 I600 HTMA 열처리방법을 선택하였다¹²⁾. Westinghouse사는 I600의 SCC 민감도 개선을 위하여 Cr 결함층 회복을 위한 방안을 모색, TT열처리 방법을 선택하였다¹³⁾. Table 3-4에 각 전열관 소재의 특성을 비교하였다. 현재 교체되는 증기발생기는 I690 TT와 Incoloy 800으로만 국한되어 있다.

Table 3-3 The chronology of fabrication and annealing conditions.

Plant Vintage	Heat Treating Condition	Approximate Tube Mill Anneal Temp.(°C)
Pre 1970's	Mill Annealed	1024
Early 1970's	LTMA	954
Late 1970's	HTMA + TT	996
*LTMA : Low Temp. Mill Annealed *HTMA : High Temp. Mill Annealed *TT : Thermally Treated, Followed by holding at 704°C for about 15 hours		

Table 3-4 Comparison of Candidate Materials for S/G tube.

	Advantage	disadvantage
Inconel 600	1.High Thermal Conductivity(19.2(W/m℃)) 2.Low Thermal Expansion Coefficient(14.2(um/m℃)) 3.High Confidence	1.Low PWSCC Resistance 2.Low SCC Resistance in OH ⁻ Solution
Inconel 690	1.High PWSCC Resistance 2.High Intergranular Sensitization Resistance	1.Low Thermal Conductivity(17.3(W/m℃)) 2.High Thermal Expansion Coefficient(14.5(um/m℃)) 3.Low Confidence
Incoloy 800	1.High PWSCC Resistance 2.High SCC Resistance in OH ⁻ Solution	1.Low SCC Resistance in Cl ⁻ Solution 2.Low Mechanical Properties at Operation Temperature 3.High Thermal Expansion Coefficient(16.2(um/m℃))

나.슬리브 재료(Sleeve Material) : 1983년까지 I600 MA, I600 TT등을 주로 사용하여 왔으며, 일부에서는 내식성 향상을 목적으로 Nickel 또는 Alloy625를 코팅하여 사용하기도 하였다. 현재는 PWSCC 및 IGA에 대한 저항성이 높은 I690 TT를 주로 사용하고 있으며, 최근에 개발된 ABB CE사의 PLUS SL리빙은 Incoloy 800을 사용한다.

다.용가재 재료(Additional Joint Materials) : 일반적으로 전열관/슬리브 조인트는 확관후 Hard Rolling을 하거나 용접을 하여 제작한다. 용가재를 넣는 경우는 운전환경에서 저항성, 전열관과의 적합성 등에 대한 검토가 있어야 한다. 또한 용가재가 없는 경우에도 용접에 의한 새로운 미세구조와 HAZ가 형성되기 때문에 이 부분에 열처리의 수행과 SCC 저항성 검토가 필수적이다.

제 2 절 슬리브 설치

1. 전열관/슬리브 확관 및 기밀 방법

조인트 제작방법에는 TIG or Laser Welding, Brazing, Hard Rolling, Kinetic Welding 등이 있다. 관관부에 형성되는 잔류응력을 감소시키기 위해 주로 확관(기계식 또는 폭발식)한 다음 그 중앙에 Hard Rolling 또는 용접을 하는 방법을 사용한다. 슬리빙시 발생하는 결함 중 상당부분이 조인트에서 발생하는데 그 결함은 1)PWSCC 2)관지지판과 조인트된 전열관에서 축방향 팽창에 대한 저항에 기인한 비틀림 3)브레이징과 같은 고온 작업에 기인한 결함 4)HEJ에서 누수 등이 있다. 조인트 제작은 구조적 건전성과 누설차단을 목적으로 실시하며, 관관 슬리빙시 상하부의 조인트는 다른점이 많다.

가.확관방법 : Mechanical Expansion은 관관 하부에 사용되며, 많은 발전소에서 PWSCC를 경험하였다. 따라서 확관 후 잔류응력점검을 통해 PWSCC 가능성을 검토하여야 한다. I690 TT는 I600 MA 또는 I600 TT에 비하여 응력제거 열처리를 하지 않아도 PWSCC 저항성이 우수한 것으로 나타났다. Hydraulic Expansion은 관관 상하부에 사용되며, Mechanical Expansion에 비해 점진적인 방법으로 PWSCC에 대한 저항성이 우수하다. Explosive Expansion 또는 Kiss-Roll은 관관 상하부에 사용되며, 점진적인 방법으로 Hydraulic Expansion과 유사하나 PWSCC를 경험하였다. Table 3-5는 확관 방법에 따른 PWSCC 경험 결과를 나타내고 있다.

Fig.3-2는 Roll, Explosive, Hydraulic Expansion에 의한 확관시 전열관에 도입된 잔류응력과 부식성 분위기에의 균열발생 가능성에 대한 상관관계를 보여주고 있다. Explosive Expansion과 Hydraulic Expansion의 경우가 Roll Expansion에 비해 확관시 도입되는 잔류응력의 정도가 상당히 낮으며, 이에 따라 최초 균열이 발생하는 시간도 길어짐을 알 수 있다. 이는 Explosive Expansion과 Hydraulic Expansion이 확관시 전열관 내벽과 접촉하는 부하하중이 상대적으로 응력집중이 덜 걸리는 변형접촉방식이므로 Roll Expansion에 비해 잔류응력이 덜 걸리며, 균열발생 시간도 길어지는 것으로 사료된다.

나.기밀 유지 방법(Sealing Method) : Hard Rolling은 관관 하부에 Hydraulic Expansion을 통한 확관 후, 조인트 제작시 주로 사용된다. 확관 방법에 비하여 좁은 영역에 집중되며, 고인장잔류응력을 유발시키는 단점이 있다. Brazing법은

Gold Nickel Alloy를 조인트부분에 사전 도포한 다음 Hydraulic 또는 Explosive Expansion을 실시하며, 조인트부에 유도 또는 전기 코일을 통하여 1066℃로 온도를 상승시킴으로써 용융, 접합하게된다. 주로 관판 상부에 사용된다. TIG 용접법은 관판 하부의 확관부 중앙 또는 끝 부분에 사용된다. 몇몇 업자는 컴퓨터 제어를 통한 펄스 TIG 용접으로 비틀림과 잔류응력을 최소화시킬 수 있다고 제안하였다. Laser 용접법은 Doel 3 발전소에 CO₂ Laser를 사용하여 시험적으로 실시하면서 응용되기 시작하였다. Laser 용접법은 TIG 용접법에 비하여 1)환경에 덜 민감하며, 2)2차측에 유입되는 에너지 양이 적고, 3)높은 생산속도를 갖는 장점이 있다.

Table 3-5 Expansion Method and PWSCC Experienced.

Expansion Method	Plants	PWSCC Experienced
Mechanical(Part Depth)	30	10
Mechanical(Full Depth)	30	15
Explosive	13	4
Kiss-Roll(Full Depth)	51	24
Hydraulic	29	2

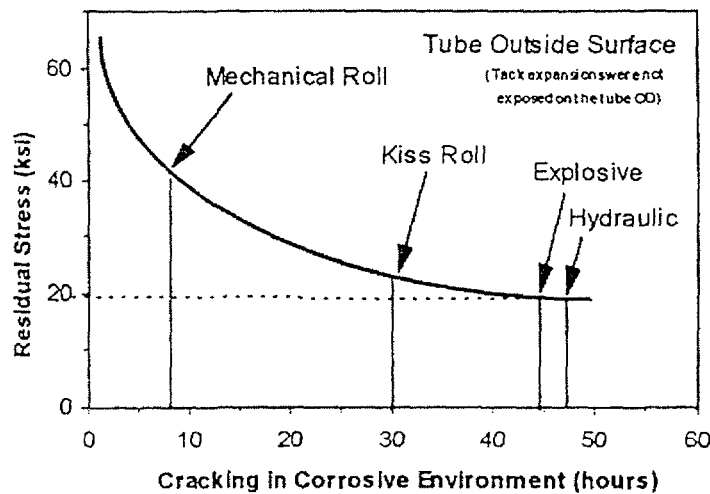
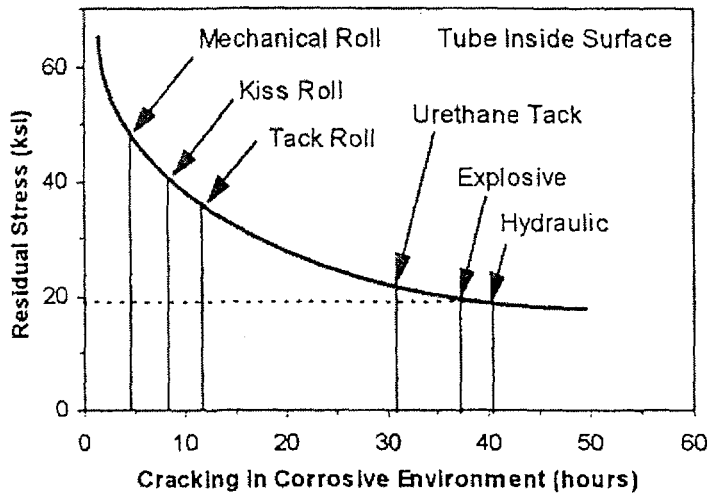


Fig.3-2 Residual Stress vs Time-to-crack Curves.

다.조인트 결함(Joint Problems)

(1)확관부 및 조인트에서 1, 2차측 SCC(PWSCC and Secondary Side SCC of Expansion Transitions and Joints) : 확관부 및 조인트 제작시 인입되는 가공유기응력과 열응력에 의해 전열관과 슬리브에서의 인장응력이 형성된다. 이때 형성되는 인장응력을 PWSCC를 유발시키는 임계응력 이하로 유지시키는 것이 중요하다. 예방조치사항으로는 다음과 같다. 1)1,2차측에 대한 SCC 저항성이 우수한 슬리브를 선택한다. 2)설치절차에서 인장응력을 유발할 수 있는 모든 인자를 고려하여 인장응력을 최소화한다. 3)SCC 저항성을 갖는 조인트를 제작한다.

(2)관지지판에서 축저항에 기인한 비틀림(Distortion due to Axial Resistant at Tube Support Plate) : Denting 제거를 위한 열처리, 용접 및 브레이징, 응력제거 열처리시에 축방향 팽창이 발생하여 압축응력이 형성되며, 이에 따라 국부적인 항복 및 Buckling 현상이 나타난다. 따라서 열처리된 부분에서 항복강도가 저하하게된다. 해결책으로는 전열관을 예열하거나 공정 변수를 제어하여 열처리 온도 및 전열관 길이 변화를 최소화한다.

(3)브레이징에 기인한 문제(Brazing Problems) : 브레이징 작업을 통한 조인트 제작의 도입 초기에 San onofre, Ginna 발전소에서 많은 문제들을 경험하였다. 브레이징을 이용한 슬리빙시 Sludge를 통한 급속한 열확산 때문에 설정 온도 이하보다 낮아지거나, 과열로 인한 슬리브 및 전열관의 용해¹⁴⁾, 축방향 팽창으로 인한 접합성 저하¹⁵⁾ 현상이 발생하였다. 이러한 문제는 브레이징 공정을 개발하거나 Pre-tension 등을 통해 해결할 수 있다.

(4)HEJ에서 누수(Leakage of Hydraulically Expanded Joints) : 전열관/슬리브 사이의 작은 틈을 통해 누설 현상이 나타난다. 해결방안으로는 HEJ 중앙부에 기계식 Rolling을 통하여 Sealing하는 방법이 있다. 이 방법을 통해 누설 속도를 0.08gph(5cc/min)에서 0.01gph(0.05cc/min)로 낮출 수 있다¹⁶⁾.

(5)레이저 용접에 기인한 문제(Laser Weld Problems) : 레이저 용접법 적용 초기에 발생한 문제로, 용접부 표면의 파동현상으로 UT 검사가 곤란하였다¹⁷⁾. 또한 급속 용융 및 응고에 의한 응고균열에 민감하여, 잔류인장응력이 높아 반드시 잔류응력 제거 열처리가 필요하다.

(6)요약(Summary) : 실제응용과 모의시험을 통한 자격검증은 많은 차이가 있다. 위에 열거한 문제들을 극복하기 위한 방안으로 1)운전조건에 대한 정확한 이해, 2)자격시험에서 실제 적용할 경우 야기될 수 있는 모든 상황에 대한 시험 수행, 3)대량 슬리빙에 앞서 소량 예비 슬리빙을 통한 예기치 않은 문제의 발견 등

을 들 수 있다.

2. 잔류응력 제거열처리

응력제거열처리 전에 자격요건에 대한 검증이 필요하다. 그러나, 실제 적용 과정에서 모의 시험의 재현성부족으로 브레이징 및 응력제거 열처리와 같은 고온 작업의 경우 많은 문제점을 유발하였다. 관지지판에서의 전열관 Locking 현상은 조인트를 제작 할 때 팽창 및 수축에 기인한 Buckling 및 고인장잔류응력 발생으로 나타난다. 또한 열경계 조건이 위치에 따라 변화하는 것을 그 예로 들 수 있다. 환관부에서 잔류응력을 최소화하기 위해서는 환관 방법의 선택이 매우 중요하며, 잔류응력제거를 위한 열처리시 고려해야할 제반 사항은 다음과 같다. 1) 냉각시 슬리브 수축에 따른 Pullout Force 감소 2) 환관 Crevice에 대한 슬리브의 저항성 3) 환관에 대한 온도의 영향 등이다. 일반적으로 환관 하부 조인트는 잔류 압축응력으로 응력제거 열처리가 불필요하다.

가. 온도제어(Temperature Control)

일정한 입열량을 인가하려면, 공정 온도 구역이 넓고, 열전달 조건이 일정해야 하며, 온도 측정시 사용되는 센서에 대한 정확한 검증이 필수적이다. Dole 2 발전소는 전열관과 환관 사이의 Gap에 의해 열전달 특성의 변화를 경험하였다. 따라서 형상에 따른 열전도도 변화에 대한 정확한 온도 제어가 중요하다.

나. 표면오염(Surface Contamination)

응력제거 처리과정 중 표면의 오염물에 기인한 균열 및 IGA 가능성이 있으므로 이에 대한 주의가 요구된다.

다. 축 저항에 기인한 Buckling 및 인장잔류응력(Buckling and Tensile Residual Stress due to Axial Resistant)

환관 상부 및 첫 번째 관지지판에서 Denting에 의해 전열관이 Locking되었다면 브레이징, 용접, 응력제거처리와 같은 고온 작업시 전열관의 국부적인 Buckling 및 인장잔류응력이 발생한다. 따라서 1. 2차축 IGSCC 가능성이 잠재하게 되므로 주의가 요구된다.

라. 환관에서 응력제거 효과(Effects of Stress Relief in Tube Sheet)

환관에서 응력제거가 요구될 때 다음 사항을 고려하여야 한다. 1) 냉각 수축에 기인한 환관의 전열관 지지 힘 축소, 2) 가열에 의한 전열관과 환관 사이 간격 증가, 3) 파괴인성 변화 같은 환관 재료 특성에 미치는 영향 등이 고려되어야 한다.

제 3 절 자격 요건

1. 자격 시험

자격시험은 중요변수들을 고려한 정확한 사전실험을 통하여 증기발생기가 경험할 수 있는 상황을 분석하는 방법이다. 중요 고려변수들로는 관지지판에서 전열관의 Locking 여부, Sludge의 열전도도, 전열관의 OD Deposit 등이다. 관판 상하부의 조인트 자격검증시험은 다음과 같다. 1)조인트에서 잔류응력 저하를 빠르게 확인하기 위한 예민화처리된 I600의 Sodium tetrathionate 용액 시험 및 스테인리스강의 끓는 Magnesium Chloride 용액 시험, 2)운전온도에서 I600과 슬리브 재료의 10% Sodium Hydroxide 용액시험 또는 고온 증기 시험, 3)PWSCC 민감성 재료에 대한 1차 고온 냉각수에서의 장기간 PWSCC 시험 등을 수행한다. 설치방법에 대한 다양화를 유도하고 문제발생에 대한 조기경고를 위한 소량의 슬리브를 현장 설치한다. 새로운 슬리브 설치 및 기존 슬리브 보완시에 다음과 같은 사항이 요구된다.

- 설치방법에 따른 조인트 강도 및 Leak Tightness 만족
- PWSCC에 대한 저항성
- 공정 변수 범위에 대한 평가
- 장치와 절차가 보수 계획 및 방사선 피폭에 미치는 영향
- 용가재에 상기 내용 적용

가. 부식실험(Corrosion Test)

부식 가속화실험은 슬리빙 기술에 대한 효용성을 평가하며, 1,2차측 SCC에 대한 가능성을 검토하는데 유용하다. 그러나 이러한 가속화실험이 실제 열화기구와 다르며, 실제 운전 환경에서 결함을 유발하는 임계응력과 일치하지 않는다는 점에 주의하여야 한다. 실제 운전 조건에서 I600 LTMA에 대한 PWSCC 유발 임계응력은 40ksi로 I600 LTMA의 탄성한계와 유사하며, 공칭항복응력의 약 80%에 가깝다¹⁸⁾. 2차측 Crevice와 Sludge 환경에서 SCC에 대한 임계응력은 정확히 알려져 있지 않으나 25ksi 이하이다. Yonezowa는 인가응력이 공칭항복응력의 80%이하일 때 I600 LTMA에 대한 PWSCC 발생시간이 증가한다고 보고하고 있다¹⁹⁾.

가속화 실험은 40ksi이하에서 실시되며, 일부 실험에서 항복응력 20%이하의

인장응력에서 SCC가 발생하였다. 낮은 임계응력으로 가속화 실험을 통과한 재료가 실제 현장에서도 우수한 특성을 나타내기도 한다. 또한, 실험 중 균열이 생성되었다고 해서 현장에서도 반드시 균열이 생성된다는 것을 뜻하진 않는다.

나. Stainless Steel Tubes in Boiling Magnesium Chloride

이 실험을 통해 슬리브 설치방법에 따른 가공 유기 응력의 고저를 판정할 수 있다. Stainless Steel Tubes 시편을 끓는 Magnesium Chloride 용액에 24시간동안 침지 시킨다. Stainless Steel 종류와 시험환경에 따라 SCC에 대한 임계응력이 변화된다. 실험결과, 인가응력이 13ksi(90MPa)이상일 때 24시간이후에 균열이 발생하였다²⁰⁾.

다. Sensitized Tubing in Polythionic Acid and Sodium Tetrathionate

목적은 위의 실험과 동일하다. I600 MA 시편을 소량의 sulfur oxyanion을 포함하는 낮은 온도의 Polythionic Acid 또는 Sodium Tetrathionate 용액에 침지 시킨다. 실험결과, 응력이 I600 MA의 20%Y.S(Yield Strength)이상이거나, 8-10ksi(55-70MPa)이상일 때 24시간내에 SCC가 발생한다. Sodium Tetrathionate 용액은 재료의 desensitization을 유도하므로 용접 및 응력제거 열처리와 같은 고온 공정 재료에는 부적합하다.

라. 10% Sodium Hydroxide

10% Sodium Hydroxide용액은 I600 MA에 대한 1차측 IGSCC, 2차측 Crevice를 가속화시키는 환경과 유사하다. 결함을 가속화시키기 위해 288°C의 Autoclave에서 양극 전위 190mV가 인가되며, Primary Water의 Hot Leg 온도인 324°C에서는 250mV가 인가된다. 실험결과, 현장에서 1년동안 운전결과를 36시간의 시뮬레이션을 통해 점검이 가능하였다. 응력이 10ksi 이상일 때 36시간 내에 균열이 발생하였으며, I600 MA 항복응력 20% 이하의 응력에서는 상온 실험의 경우 700시간이후에 균열이 발생하였다²¹⁾

마. Elevated Temperature Steam Tests

과거 수년동안 많은 연구자들에 의해 고온 증기에서 PWSCC 가속화 가능성을 입증하였다. 한 접근방안으로 수소를 통한 압력 증가로 온도를 증가시키는 방법으로 400°C에서 가속화실험을 수행하였다. 활성화 에너지를 기초로 한 모델에서는 Hot Leg 운전온도와 관련한 많은 변수에 의해 PWSCC가 가속화되었다. Hydrogen Fugacity, pH의 영향을 받는 Lithiated Borated Water와 증기의 수질 화학 차이에 의해 가속화요인의 정확한 예측은 불가능하였다. EdF의 실험결과에 의하면 본 실험을 통하여 재료의 PWSCC 민감성에 대한 정확한 순위 결정이 가

능하다고 한다²²⁾. 재료의 상대적인 Time to Failure는 C-ring 실험을 통해서 얻어질 수 있는데, 실험결과는 Table 3-6과 같으며 57ksi 이상에서 SCC가 발생하는 것으로 나타났다²³⁾. 불순물이 혼입된 증기에서는 이 보다 낮은 임계응력에서 SCC가 발생하는 것으로 나타났다²⁴⁾. 따라서 고온 증기 시험을 통해 총응력 (Residual, Pressure, Thermal and Bending etc.)이 40ksi와 같거나 그 이하임을 분별하는 것이 가능하다.

Table 3-6 Test Results of Elevated Temp. Steam Tests.

Test Conditions	Time to First Failure(hr)		Time to Failure Ratio
	Reverse U Bends	Flat U Bend	
400°C Steam(1bar, H2)	100	>3000	>30
325°C Steam(3bar, H2)	3000-4000	15000	=5

바.Primary Water Test at Elevated Temperature

본 실험은 PWSCC에 대한 가장 대표적인 가속화 실험으로 Hot Leg 온도보다 높은 360°C에서 실시된다. 최근 연구에 의하면, 용존 수소 농도 및 고온 수질 화학은 가속화를 감소시킨다고 한다.

사.Primary Water Test at Operating Conditions

증기발생기에서 PWSCC에 민감한 재료를 324°C, 수소과부하, 높은 pH에서 PWSCC에 대한 저항성을 평가하는 실험이나, PWSCC를 발생시키는데 수년이 요하므로 실용적이지 못하다.

자.Field Experience

실제 가동조건에서는 PWSCC를 발생시키는데 수년씩 걸리므로 이와 같은 방법은 실용적이지 못하며, 슬리브 기술 개발에 적용하는 것 또한 적당치 못하다. 장점으로는 슬리브 설치시 예상치 못한 문제점에 대한 정보 및 효율성에 대한 분별력과 설치방법의 다양화를 이룰 수 있다.

차.Summary

앞에서 언급한 실험에서 목적에 따른 실험방법을 요약 분류하여 Table 3-7에 나타내었다.

Table 3-7 Classification of Accelerated Tests.

Classification	Experimental Method
Residual Stress	Boiling Magnesium Chloride(SUS) Sodium Tetrathionate(I600 MA)
Accelerated Test (Operating Stress < 40ksi)	10% Sodium Hydroxide(I600 MA) High temp. Doped Steam
Long Term Performance	Elevated Temp. Primary Water

차. Qualification Test Program Issues

자격시험에 관한 주요 논제는 다음과 같다. 1) 일부 시험만을 통한 슬리브 설치, 2) 슬리브 기술에 대한 일부 특징만을 실험, 3) 소수의 변수를 통한 현장 시뮬레이션, 4) 공정변수범위 중 특정 범위만의 실험 등이다. 이와 같이 일부 실험을 통해서 자격시험을 완벽하게 완료할 수 있기 위해서는 다음 사항을 포함하여야 한다. 1) 관관 및 관지지관 상부에서 전열관의 Locking 시뮬레이션, 2) 관관 Crevice의 이탈 조건 시뮬레이션 범위, 3) 전열관 OD의 이탈 조건 및 Sludge의 열전도도 시뮬레이션(공정에 대한 OD Sludge의 영향이 없음을 확인), 4) 최대 및 최소 확관량, 5) 최대, 최소 온도 등을 포함하여야 한다.

타. Laborelec Qualification Test Program

Laborelec은 Doel 및 Tihang 발전소 증기발생기 전열관의 PWSCC 손상에 대한 보수의 자격시험 및 적용에 대하여 수년간 담당해 왔다. 다음 사항은 조인트부 상부 자격시험의 개요이다²⁵⁾.

- 육안검사(Visual Inspection) : 내외벽 표면을 육안 검사하는데, 외벽은 Stereomicroscope로 내벽은 Endscope로 검사한다. 용접부는 시작점에서 끝점까지 검사하며, 전열관 절단시는 Stereromicroscope로 검사한다.
- 치수 측정(Dimensional Measurement) : 내경은 Micrometer로 외경은

3-Point micrometer로 측정한다.

- 누설 검사(Leak Test) : 100psi(7bar) Freon Gas를 사용하여 검사한다.
- 잔류응력측정(Residual Stress Measurement) : X-ray를 이용하여 원주 및 축 방향을 검사한다. 1)용접후 응력제거 미처리, 2)용접후 응력제거 처리, 3)용접후 노내에서 응력제거처리한 시편이 사용된다. 3)번 시편을 노내에서 응력제거처리하는 것은 Internal Probe를 사용한 In-situ 열처리와 비교를 목적으로 한다.
- 미세조직검사(Metallographic Examination) : 세로방향으로 단면을 절단후 SEM을 통해 미세조직을 검사한다. Mable 에칭, 옥살산 전해에칭, Bromine-Methanol 에칭 등을 사용한다.
- 입계에민화(Intergranular Sensitization Test) : 시험방법으로는 Modified Huey 시험(Boiling 65% HNO₃, 7-24hr), ASTM G-28 Practice A(Boiling Ferric Sulfate, 50% H₂SO₄), EPR(Electrochemical Potentiometric Reactivation)이 사용된다. EPR법은 30℃의 0.3M H₂SO₄ + 0.001M KSCN 용액에서 수행한다. 표준 전극으로는 포화감홍전극(SCE)를 사용하고, 개방전위에서 1.4mV/sec의 속도로 +400mV까지 양극 scan한 후 동한한 속도로 다시 부식전위 까지 역 scan한다.
- 경도측정(Hardness Measurement) : Vickers 경도기를 이용하여 확관부와 용접부를 각각 2.0, 0.1kg의 하중을 이용하여 측정한다.
- 인장시험(Tensile Test) : 상온에서 Stipe 시편을 사용하여 측정한다.
- 응력부식균열시험(Stress Corrosion Cracking Tests of As-Received Specimens) : 온도 350℃, 압력 0, 100-200bar의 조건으로 Autoclave에서 행해진다. 시편은 상단 조인트부를 열처리 한 것과 하지 않은 것, Mill Annealing한 후 Rolling 조인트부를 제작한 것을 사용한다. 본 실험의 목적은 서로 다른 업자에 의해 제작된 I600 MA 전열관, 확관부, Mockup을 비교하여 순위를 결정한다. 또한 균열진전과정에서 인가응력과 잔류응력의 역할을 규명하고자 한다.

2.분석검증(Analytical Verification)

가.응력해석(Stress Analysis)

응력해석은 Pressure Vessel Code 와 ASME Boiler Part B Section III에 따라 수행하며, 압력과 열응력을 포함한 정상적 또는 비정상적인 모든 범위(Main Steam Line Break, Feed Water Line Break etc.)를 다룬다. 1,2차측 응력을 계산한 다음, Code와 비교한다. 피로용량인자를 계산하여 그 값이 1.0이하임을 확인

한다. 정확한 해석이 곤란한 경우에는 피로시험을 수행하여 분석한다.

나.진동해석(Vibration Analysis)

슬리빙이 진동증폭과 진동유기응력을 유발시키는지에 대한 점검이 필요하다.

다.열/수력해석(Thermal/Hydraulic Analysis)

슬리빙이 Sleeve/Plug Ratio로 표현되는 유속 및 압력감소를 유발시키는지에 대한 점검이 필요하다. 이를 통해 발전소의 플러깅 한계와 플러깅 상황에 대한 빠른 비교 분석이 가능하다.

라.지진해석(Seismic Analysis)

슬리빙이 지진에 대한 저항성을 약화시키는지 점검하여야 하며, 열화된 전열관 강도를 제로로 가정하였을 때 가동하중의 지탱여부를 확인한다.

마.사고해석(Accident Analysis)

슬리빙이 Feed Line Break, Main Steam Break, LOCA's 등의 사고 하에서 Double Ended Tube Breaks의 가능성을 증가시키지 않도록 한다. 또한 사고 하중에 대한 저항 강도를 만족하여야 한다.

바.설치(Installation)

슬리브의 설치단계는 다음과 같다. 1)세관 세척 2)초기검사 3)슬리브 삽입 4)조인트부 확관 5)Sealing 6)응력제거 7)최종검사의 순으로 진행한다.

슬리브 설치의 다중방식 및 자동화는 효율증대와 방사선노출 최소화할 수 있다. Vender는 누설과 같은 문제에 대비해서 재보수 계획을 수립하고 있어야 하며, 가능하면 제거 가능한 플러깅을 설치하여 향후 필요시에 검증된 슬리빙을 하는 것이 좋다.

3.검사(Inspection)

검사는 설치전 슬리빙을 준비하기 위한 검사, 설치후 슬리브 설치를 검증하기 위한 검사, 가동중 슬리브/전열관의 열화를 점검하는 가동중 검사가 있다.

가.설치전 검사(Pre Sleevig Inspection)

설치전 육안 및 ECT를 통해 다음 사항을 점검하여야 한다. 1)조인트부에서 전열관의 건전성 2)전열관 내벽 3)전열관 및 슬리브의 청정성 4)슬리브 치수(길이, 직경, 두께)의 적정성 5)슬리브 위치를 점검하여야 한다.

나.설치후 검사(Post Sleevig Inspection)

슬리브 설치후 검사항목은 1)조인트 치수 2)용접부 품질의 적정성(Visual,

ECT, UT) 3)정기검사에 대비한 슬리브/전열관의 데이터베이스 작성 4)조인트 검사(ECT)등 이다.

다.가동중 검사(Inservice Inspection)

전열관 열화 검사와 같이 슬리브에 대한 열화 검사를 실시하며, ECT 검사 방법을 이용한다. 슬리브 두께 및 직경의 감소는 ECT 민감도를 감소시키므로 슬리브 기술과 ECT 요구사항의 적합성 확인이 요구된다. 보정표준(Calibration Standard)은 슬리브 기술에 따라 차이점이 있다.

라.기준 검사(Baseline Examination)

기준검사는 정기 검사시 데이터베이스로 사용되므로 모든 전관에 대해 실시 되어야 한다. 전열관/슬리브의 상부 조인트 Gap에 Magnetite가 축적하는 현상이 종종 발생한다. 이러한 현상은 슬리브에서 신호의 비틀림을 유발하여 전열관의 건전성 확인에 어려움을 주기 때문에 다음 정기 검사시 신호의 비틀림에 대한 모니터링이 필요하다. 또한 노이즈에 대한 신호 감소의 비(Reduced signal to noise ratio)를 통해 작은 크기의 균열 검출능을 수정할 수 있다.

마.전형적인 검사 방법(Typical Inspection Method)

슬리브 검사 방법으로는 위에서 언급한 대로 육안검사, 치수검사, ECT, UT 검사 방법이 사용된다. B&W는 모재/슬리브에 대한 ECT검사의 자격시험에 대해 보고하였다²⁶⁾. Fig.3-3은 Kinetic 용접부에서 검사위치와 보빈 Coil 민감도를 보여주고 있으며, 모든 검사 위치에서 20%결함을 나타내고 있다. Laborelec은 관상부의 레이저 용접부에 대한 용접폭 및 Leak Tightness를 검사하기 위해 UT 방법을 사용하였다²⁷⁾.

바.Probe Type

End Effect와 직경변화에 따른 신호의 증폭 현상 때문에 확관부 및 조인트 상부는 검사하기가 곤란하다. 비대칭 조건을 억제하는 Cross-Wound Probe와 Transmit/Receive Probe에 의하여 신호를 감소시킬 수 있다. 일반적으로 위와 같은 Probe는 세심한 제어가 요구되며, 불균일 표면 검사에 적당하다. 따라서, 전체 전열관 내벽에 대한 적절한 Probe Type의 확정이 필수적이다.

사.Bimetallic Sleeve

2차측의 내식성을 향상시키기 위해 Nickel를 클래드 재료로 사용한 Bimetal 슬리브 기술은 추가적인 검사가 요구된다. 왜냐하면, Nickel 클래드층이 강자성이므로 EC Coil Excitation Frequency 감소에 의한 ECT 침투 깊이가 감소하며, 클래드층의 두께 및 투과도의 변화는 잉여의 신호를 유발하여 비자성 클래드에 비

B&W RSG KINETIC WELD SLEEVE N.D.E. CAPABILITY

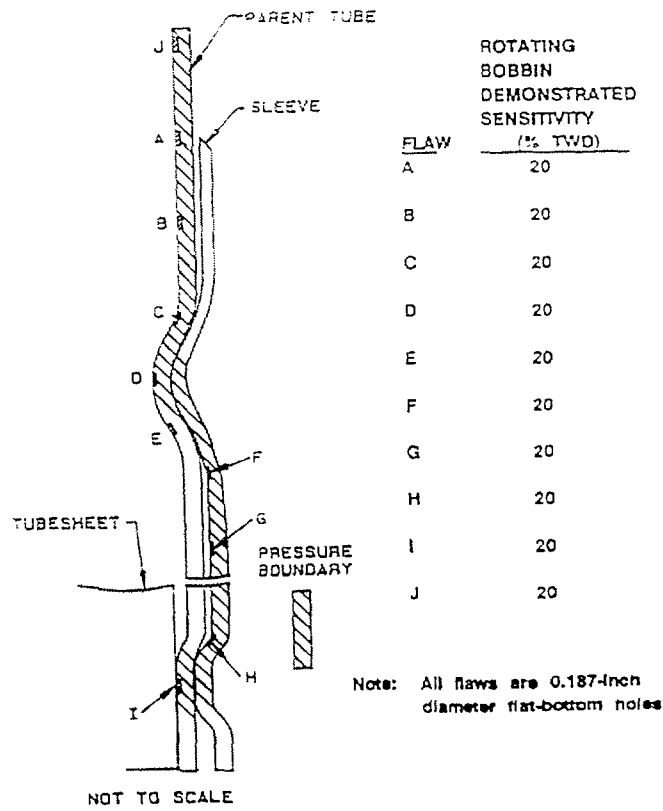


Fig. 3-3 Inspection Locations and Bobbin Coil Sensitivity Reported by B&W.

하여 검사능력이 감소하기 때문이다. 이러한 강자성 문제는 ECT 검사와 자기포화기술(Magnetic Saturation Techniques)에 의해 어느 정도 해결이 가능하다.

아.검사 절차 확인(Inspection Procedure Confirmation)

Postulated Failure Mode와 결함을 포함하는 보정 시편(Calibration Sample)과 같은 Mockup을 사용하여 결함검출능력을 확인하는 것은 슬리브 기술 선택 다음으로 중요하다. 용접부 상단에서 원주방향 균열은 슬리브의 파열을 유도할 가능성이 있으므로 중요한 열화모드이다.

자.요약(Inspection Summary)

슬리브 뒷부분에 있는 전열관은 슬리브에 가리워져서 검출이 곤란하므로 이에 대한 40% 열화를 검출할 수 있는 능력은 Licensing Requirement를 판별하는 중요한 요인이며 주요 관심사이다. 특히 상단 용접부의 HAZ(Heat Affected Zone)영역에서 원주 방향 균열의 검출은 매우 중요하다. 보정시편이 대표적인 결함들을 포함하고 있는지 여부와 검사장비 및 절차가 결함위치에 정확하게 배치할 수 있는지의 여부는 자격화 프로그램에서 중요한 요인이다.

4.검사방법

증기발생기 전열관의 검사방법은 대부분의 경우 와전류 탐상을 사용하고 있는데 이는 와전류 탐상의 여러 특성들이 얇은 막의 전열관 결함을 탐지하기에 적당하기 때문이다. 일반적으로 사용되는 와전류 탐상 탐촉자는 Bobbin 코일 및 회전형 Pancake 코일(+Point MRPC 포함) 탐촉자이며 그 외에도 Array 코일 탐촉자와 초음파 탐촉자도 경우에 따라 적용되고 있다. Table 3-8은 이와 같은 방법들의 특성들을 간단히 요약하였다.

Table 3-8 Comparison of Steam Generator Tubes Inspection Method

	장점	단점	특성	적용
Bobbin 코일 와전류 탐상	-고속검사 (40inch/sec) -저비용 -기계적 신뢰도 높음 -축방향 검출 양호 -체적결함 탐지 양호	-균열성 결함 (PWSCC, IGA, IGSCC)탐지 어려움 -원주방향 균열검출 취약	-Bobbin 코일축이 전열관축과 평행되도록 설계 -와전류는 원주방향으로 유도됨 -코일은 절대비교 및 차등 비교형 모두 사용	전 열관에 대한 전장 검사방법으로 사용
회전형 Pancake 코일 와전류 탐상	-축방향, 원주방향의 검출 가능 -균열성 결함 탐지 가능 -가장 정밀도가 높은 검사방법	-검사속도 느림 (0.2inch/sec) -고비용	-2mm직경의 Pancake 코일축은 전열관 표면과 수직 -와전류는 전열관표면에 평행한 작은 원형형태임. -작은 부위에 와전류를 집중시켜 정밀도 높임. -일반적으로 코일은 절대 비교형 모드로 사용	-Bobbin 코일 검사후 결함의 크기, 형상 등의 확인에 사용 -취약부위(U-bend, 확관천이부근)의 정밀검사에 사용
Array 코일 와전류 탐상	-Pancake 코일검사의 단점인 속도를 향상시켰음. -Bobbin 코일보다 원주방향 균열검출 능력이 좋음	-Bobbin 코일보다 텐팅의 결함 검출 능력 떨어짐 -Probe 형상에 의한 lift-off 효과에 민감함	-탐촉자 원주방향에 8개의 독립 Pancake 코일 부착 -검출능력이 Bobbin 코일검사법과 회전형 Pancake 코일 검사법의 중간 정도	-반진동봉(AVT) 부위에서의 마모 검출 -많은 량의 전열관 원주방향 결함 검출에 사용
초음파 탐상	-재료의 전자기적 성질에 영향 안받음 (Ni-Plating 적용) -해상력이 와전류 탐상보다 좋음.	-검사속도 느림. -초음파의 전달매질 필요	-30% 관통 균열 검출 -Pitting 길이 2%까지 크기 측정가능하다 고 보고됨. -긴 축방향 결함사이의 원주방향 결함 검출 -일반적으로 45°의 전단파 사용	-슬리브, 용접부위 등 복잡한 형상 적용 -원주방향 입계 응력 부식 결함 검출

Table 3-8 Continued.

	장점	단점	특성	적용
+Point MRPC 탐상	-원주방향 및 축방향 결함 검출 가능 -투과능력 높아서 전 열관 외부면 결함 검 출 가능	-코일의 45°C방향 균열에 취약	-확관부위의 결함 및 슬리브 건전성 검사 -차등비교형으로 두 개의 코일이 교차되도 록 설계	-슬리브내의 균열 검출

5.미국 원자력 위원회의 검사 규제지침 개정방향(USNRC DG-1074)

미국 원자력 규제 위원회는 1998년 6월 증기발생기 전열관의 건전성 평가를 위한 요건을 포함한 문서를 발행하고 사업자들의 검토의견을 받고 있다. 향후 미국의 세관 건전성 관련 규제의 방향을 예상할 수 있는 문서라고 말할 수 있으며, 그 내용중 전열관 검사에 관련된 주요 사항은 다음과 같다.

가.검사방법 및 검사자 인증

전열관 검사에는 일반적인 비파괴 방법(Bobbin 코일 및 회전형 Pancake 코일)이 사용될 수 있으며, 발전소 운영상태 및 결함 검출과 평가에 대한 검증된 방법을 사용하여야 한다. 전열관 검사를 수행하는 검사자는 적용하는 방법/기술에 대한 충분한 검증이 되어 있어야 한다. 또한 검사자는 발생 가능한 모든 결함에 대하여 각 결함별로 검출능력이 입증되어야 한다.

나.가동전 검사

다른 규제요건과 마찬가지로 원자로 가동전 모든 전열관에 대해서는 와전류 탐상법으로 전장검사를 수행하도록 언급하고 있다.

다.가동중 검사범위

전체 전열관의 20%이상을 전장 검사하도록 요구하고 있으며, 대상 전열관의 선정은 무작위 선정과 경험을 토대로 한 선정을 통하여 전열관 전 영역을 커버할 수 있도록 한다. 결함이 있는 모든 전열관에 대하여 부분검사를 수행하며 초기 발취검사시 성장성이 있는 결함이 발견되면 해당 증기 발생기에 대해서 전체 전열관을 검사한다.

라.추가 검사

허용 누설량을 초과하여 누설되었을 때 혹은 운전기준지진(OBE)을 초과한 지진 발생시, 냉각재 상실 사고 등을 경험하였을 경우는 정기적인 검사일정 이외에 별도의 전열관 검사를 수행하도록 권고하고 있다.

마.가동중 검사 시기

전열관 검사 주기는 기본적으로 발전소 운영검토 결과(Operational assessment)에 의해 결정되지만, 어느 경우이든지 검사주기 사이에 핵연료의 교체 2회를 초과하지 않도록 규정하고 있다. 기본적인 검사주기로 6EFPY에서 24EFPY(Effective Full Power Year)를 권고하고 있다.

바.허용 기준

전열관의 검사결과, 다음 검사 시기까지 결함이 전열관 벽의 40%를 관통하지 않을 것으로 판단되는 전열관은 별도의 보수없이 계속 사용할 수 있다. 만약 사업자가 위의 40% 관통균열 조건 이외에 새로운 대체수리 기준(ARC)을 적용하고자 하여 관련 시방서를 개정할 경우 이에 대한 승인 요청을 청구할 수 있도록 하였다.

제 4 장 증기발생기 전열관 보수기술 현황

제 1 절 보수 업체 및 기술 현황

ASME Boiler와 Pressure Vessel Section II(SB-163), Code Case(N-471-1) 규정의 항복강도를 만족하는 슬리브를 사용하였다.

1.ABB CE

ABB CE사는 14개 이상의 원자력 발전소에 14000개 이상의 슬리브를 설치하였다. ABB CE사는 I690 TT를 슬리브 재료로 사용하여 용접 기술과 PLUS Sleeve라고 불리는 기계식 기술을 개발하였다. 용접 기술은 관판부 보수를 위한 Straight Tubesheet Sleeve, 가장자리 부근의 관판부 보수를 위한 Peripheral Tubesheet Sleeve, 관지지판 보수를 위한 Tube Support Plate Sleeve이다.

ABB CE사 슬리브의 일반적인 설치 순서는 다음과 같다. 1)슬리브 설치를 위한 모재의 상하부 클리닝 2)슬리브 삽입 3)Hydraulic Expansion을 통한 상부 확장 4)상하부 용접 5)상부는 UT검사, 하부는 육안검사 6)상단 용접부 응력제거 열처리 7)ECT 검사를 통한 데이터베이스 확보의 순으로 설치한다.

슬리브를 설치하기 위한 첫 번째 작업으로 클리닝을 하는데, 호닝, Swab 또는 브러쉬(SUS Wire, Wool) 등의 방법을 사용한다. 하부 육안검사시 전열관과 슬리브 내벽을 Microship Video System으로 인위적으로 만들어진 결함사진과 비교하여 용접부의 건전성 여부를 판정한다.

가.Straight Tubesheet Sleeve

Straight Tubesheet Sleeve는 Fig.4-1에서 볼 수 있는 바와 같이 관판부의 열화를 보수하는데 사용되며, 상부는 Hydraulic Expansion후 중앙부를 용접한다.

나.Peripheral Tubesheet Sleeve

Peripheral Tubesheet Sleeve는 Fig.4-2에서 볼 수 있는 바와 같이 가장자리 부근의 관판 열화를 보수하는데 사용된다. 슬리브는 반경 R만큼 굽은 형태로, 한 쪽 끝부분은 용접하는데 알맞게 직선형태로 제작된다. 동일한 재료, 치수를 갖는 2개의 슬리브를 삽입한 후 상하부를 용접하여 조인트를 형성한다.

다.Tube Support Plate Sleeve

Tube Support Plate Sleeve는 Fig.4-3에서 볼 수 있는 바와 같이 열화된 관지

지판을 보수하는 데 적용된다. Tube Support Plate Sleeve는 웨스팅하우스의 증기발전기 모델 D의 여섯 번째 관지지판까지 적용이 가능하며, 슬리브의 길이는 8inch가 사용된다. 하나의 Leg에 설치할 수 있는 슬리브 수는 응력제거 열처리의 필요성과 관지지판의 교차점에 따라 달라진다.

라.PLUSS Sleeve

ABB CE사는 최근 Alloy 800을 슬리브 재료로 사용하고, Mechanical Expansion방법을 통한 확관과 기밀유지로 열화된 관관 및 관지지판을 보수할 수 있는 PLUS Sleeve 기술을 제안하였다. Hydraulic Expansion방법으로 몇 가지 실험을 하였다. 첫 번째 실험은 모재가 2.5%정도 소성변형 되게 하여, 슬리브의 Spring-back 효과를 유도하였다. Spring-back 효과를 통해 모재의 내경과 슬리브의 외경이 접촉하도록 하여, 가동 중 Alloy 800의 고 열팽창계수에 기인한 누설차단이 이루어지게 된다. 이 방법을 통해 거의 1300개 이상의 슬리브가 설치되었으며 만족스러운 결과를 나타내었다고 보고하고 있다. 또 하나의 슬리브 기술은 모재의 소성변형이 Zero가 되게 확관하여 응력제거 열처리의 필요성을 제거하였다. 이 방법에 대해서는 제2절 보수기술에서 자세히 논의하고자 한다.

마.Laser Welded Direct Tube Repair

ABB CE사의 Direct Tube Repair 기술은 초기에 EPRI에 의해서 개발되었으며, 후에 ABB CE사로 기술이전 되었다. ABB CE사의 Direct Tube Repair 기술은 열화된 전열관 내벽에 고내식성 재료를 용가재로 사용하여 Nd:YAG 레이저를 이용, 전열관 내벽에 클래딩하는 기술이다. 레이저빔은 광섬유를 통해 전송되며, Alloy 72를 용가재로 사용된다.

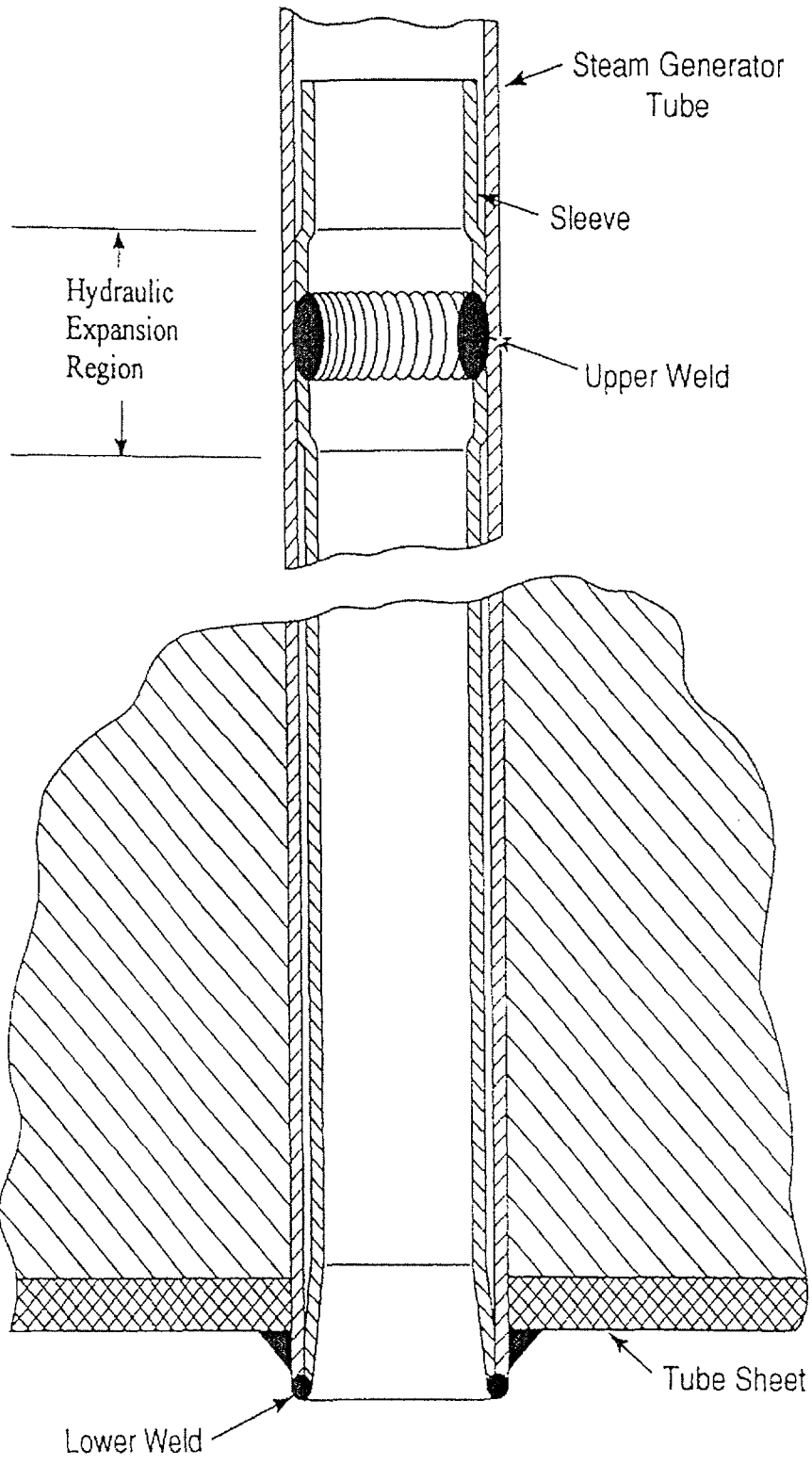


Fig.4-1 ABB CE TIG Welded Straight Tubesheet Sleeve Installation.

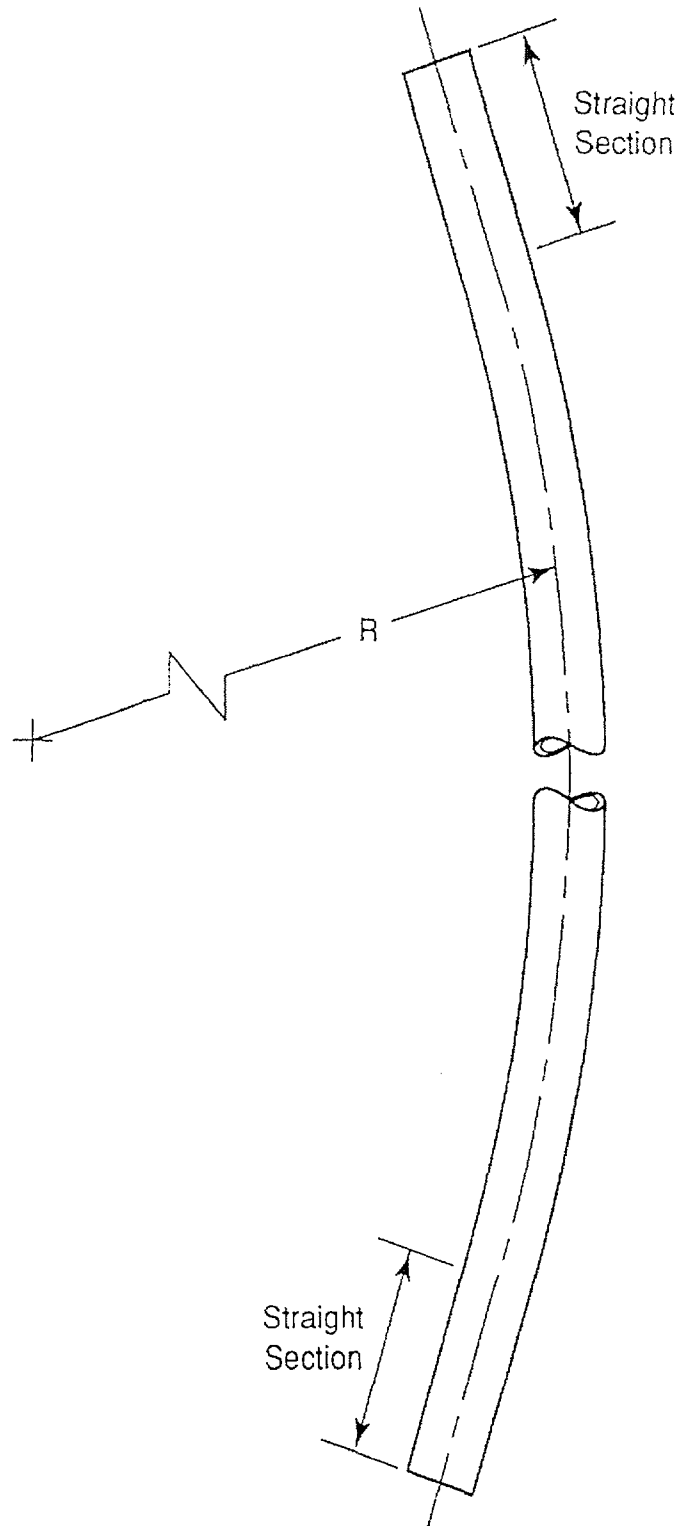


Fig.4-2 ABB CE Peripheral Tubesheet Sleeve Installation.

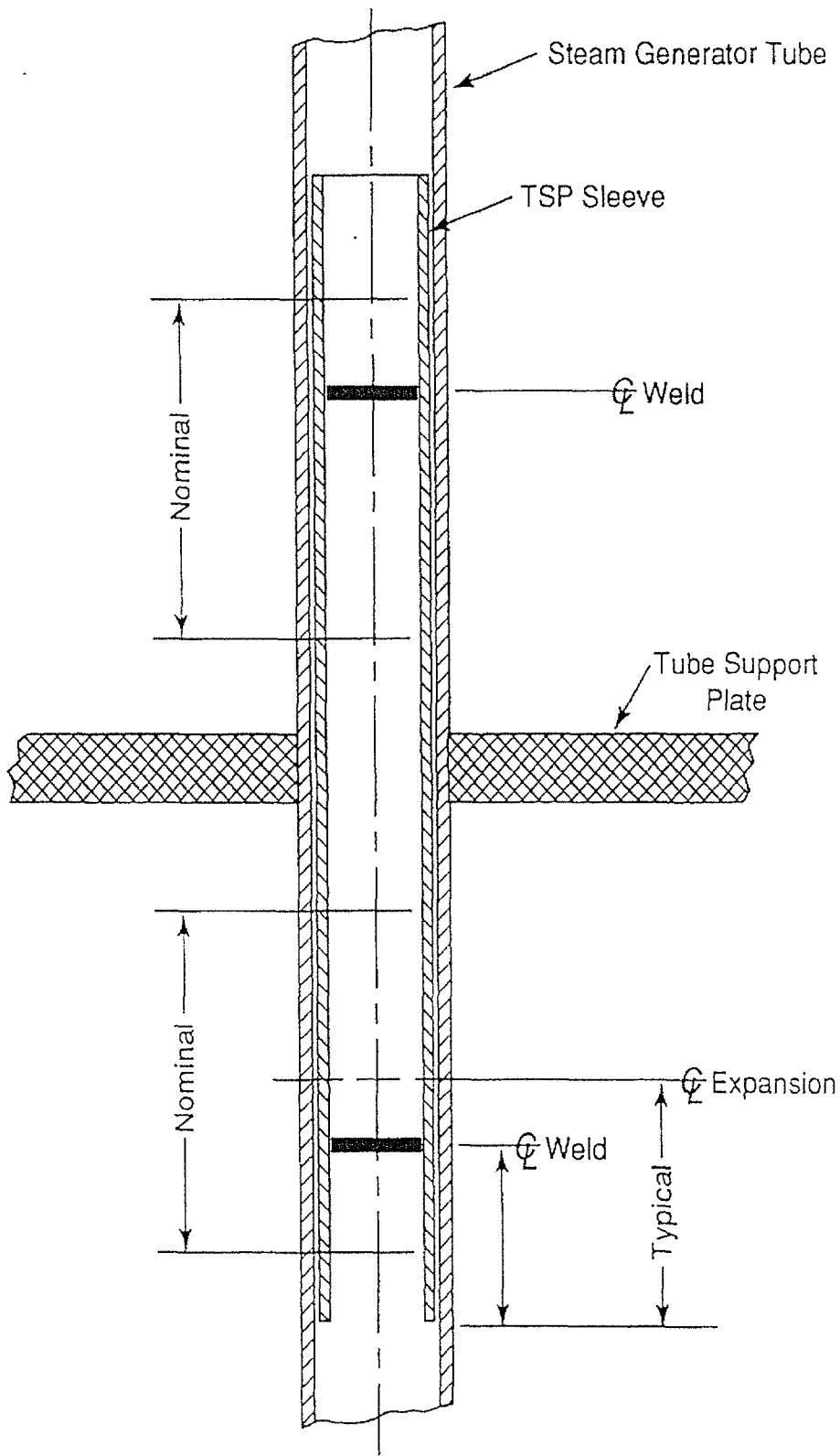


Fig.4-3 ABB CE Tube Support Plate Sleeve Installation.

2.FTI(Framatome Technolgoey Incorporate)

B&W는 Framatome과 90년대에 기업합병을 하여 지금은 FTI라는 약어로 사용되고 있다. FTI는 21개의 발전소에 10000개 이상의 슬리브를 설치하였다. 슬리브 기술은 Brazed, Hydraulic Expanded, Roller Expanded, Kinetic Sleeve의 4가지 형태와 Electrosleeving이 있으며, Kinetic은 미니 슬리브, Intratubesheet, 관판, 관지지판의 보수 위치에 따라 분류할 수 있다. Electrosleeving에 대해서는 제2절 보수 기술에서 자세히 논의하고자 한다. 재순환형 증기발생기는 관판 및 관지지판에, 일체형 증기발생기는 상하부 관판 및 관지지판, Upper Span에 설치된다.

가.재순환형 증기발생기(Sleeves for Recirculating Type Steam Generator)

슬리브 기술은 전열관의 직경에 따라 적용 위치가 달라지는데 직경이 19.05mm(3/4inch)인 전열관은 관판부에, 22.23mm(7/8inch)인 전열관은 관판 및 관지지판부에 적용이 가능하다. I690 TT를 슬리브 재료로 사용하였다.

전열관 직경이 19.05mm인 슬리브 기술은 슬리브 최소 두께가 설계하중을 지지하고 결함깊이에 대한 한계인 0.99mm(0.039inch)이며, 슬리브 길이에 따라 0.28m(11inch)와 0.44m(17.5inch)의 2가지가 있다. 0.28m 길이의 슬리브는 모든 전열관(100%)에, 0.44m 길이의 슬리브는 97%의 전열관에 설치가 가능하다.

전열관 직경이 22.23mm인 슬리브 기술은 슬리브 최소 두께가 1.27mm(0.05inch)이며, 슬리브 길이에 따라 0.28m(11inch)와 0.74m(29inch)의 2가지가 있다. 0.28m 길이의 슬리브는 모든 전열관(100%)에 전장 확관으로, 0.44m 길이의 슬리브는 75%의 전열관에 부분 확관으로 설치 사용된다.

Fig.4-4는 재순환형 증기발생에 Brazed Sleeve를 이용한 관판부 보수를 나타내고 있다. 상부 조인트는 Brazing을 하부 조인트는 Kinetic Weld를 적용하였으며, 슬리브 재료로 I600 TT, 길이는 36inch를 사용하였다.

나.일체형 증기발생기(Sleeves for Once-Through Steam Generator)

재순환형 증기발생기와 마찬가지로 I690 TT를 슬리브 재료로 사용하였다. 슬리브 최소 두께는 1.14mm(0.045inch)이며, 2.03m(80inch)와 0.38m(15inch) 길이의 슬리브가 사용된다. 기계식 Rolling으로 관판과 전열관벽이 접촉하도록 확관한다. Rolling은 구조적 건전성과 내식성을 확보하기 위해 제어된 공정으로 행해진다. 관판 상부에서 누수현상이 나타나면 기존 조인트 상부에 2차 조인트를 제작하여 누수량을 2.5ml/hr 이하로 제어한다. 슬리빙을 용이하게 하기 위해 전열관 하부 끝을 Flaring하고, ECT 방법을 통해 전열관 직경을 확인하여, 예상 조인트

에 결함유무를 확인한다. 슬리빙 후에는 ECT 방법을 통해 확관의 적정성과 향후 가동 중 정기검사에 대비한 데이터베이스를 구축한다. 슬리브 조인트의 재보수는 조인트 상부에 Rolling 확관하는 것으로 제한되어 있다. Rancho Seco, Arkansas Nuclear One, Oconee 1, Oconee 3에 2.03m 길이의 슬리브가 설치되었다.

Fig.4-5는 일체형 증기발생기에 Hydraulic Expanded Sleeve를 이용한 Upper TS와 관지지판의 보수를 보여주고 있다. Upper TS에는 18inch의 슬리브가, 관지지판에는 10.5inch의 슬리브가 적용된다. Fig.4-6은 일체형 증기발생기에서 Roll Sleeve를 이용한 보수의 단면을 보여주고 있다. 관관에는 80, 31inch의 슬리브가, 관지지판에는 14inch의 슬리브가 적용된다. 관관의 80inch 슬리브는 하부 조인트를 Upper TSP 하단에 설치한다. Fig.4-7은 미니 슬리브를 보여주고 있다. 부분 확관된 관관의 Roll Transition 부분에 미니 슬리브를 실험적으로 설치하였다. 미니 슬리브는 전장 폭발 용접되며, 슬리브 재료로 I600 TT를 사용한다. Fig.4-8은 Kinetic 방법으로 보수된 관관 및 관지지판을 보여 주고 있다. 관지지판에는 10inch 길이의 슬리브가, 관관에는 11, 17.5inch 슬리브가 각각 사용되었다. 슬리브 재료로 I690 TT가 사용되었다. 응력제거 열처리는 Double Kinetic Welding 후에 온도 760-788℃(TSP), 704-788℃(TS)에서 6min동안 실시된다.

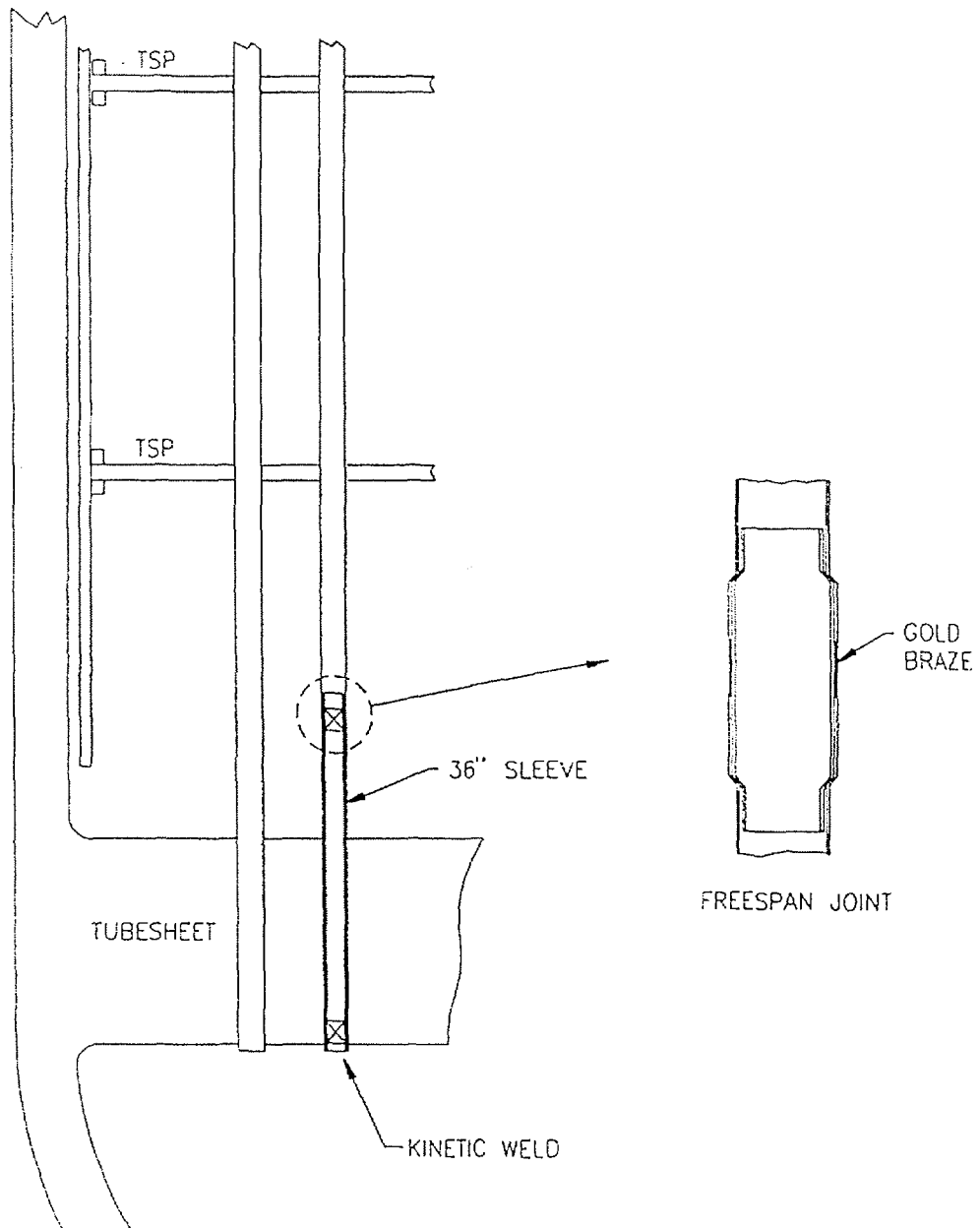


Fig.4-4 Recirculating S/G Brazed Sleeve.

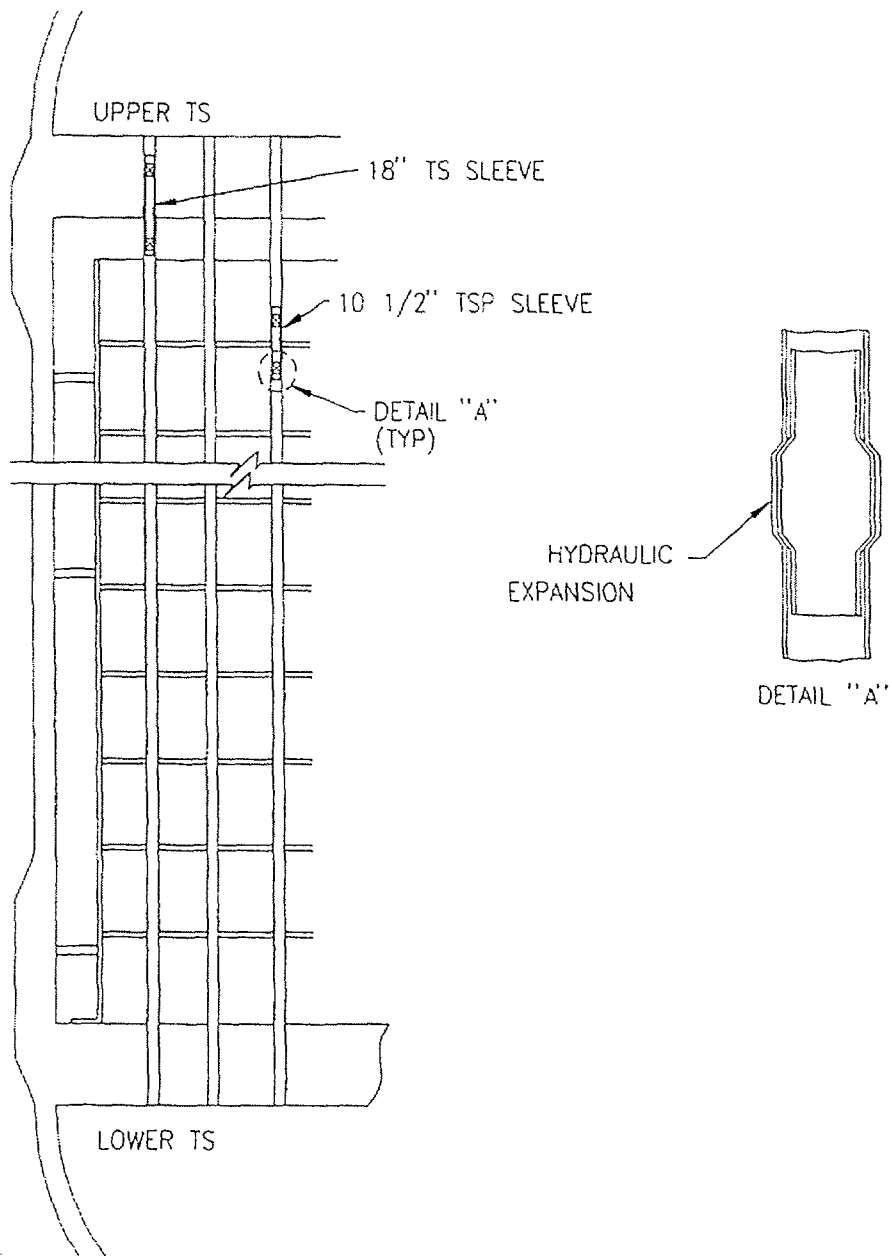


Fig.4-5 OTSG Hydraulic Sleeve.

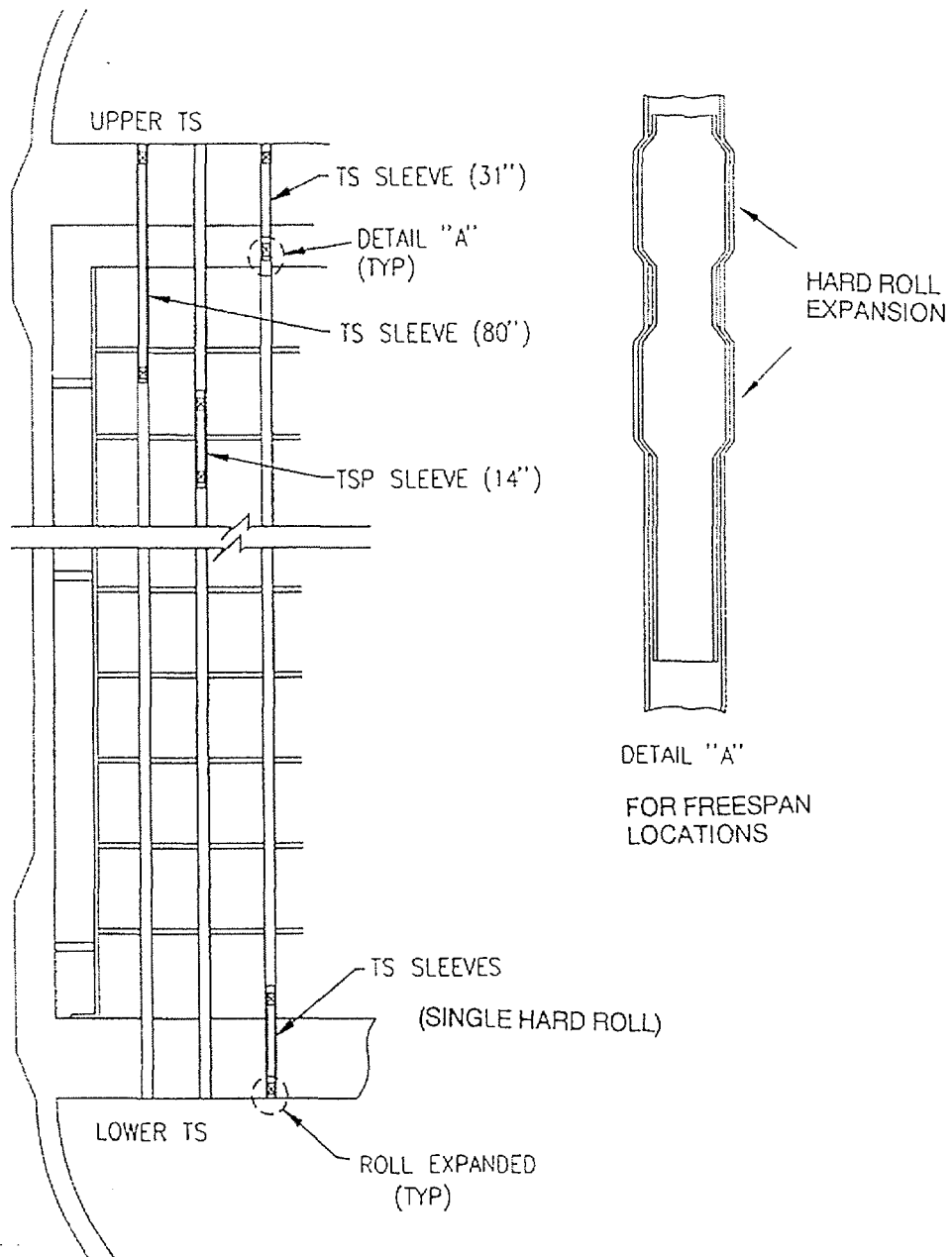


Fig.4-6 OTSG Rolled Sleeve.

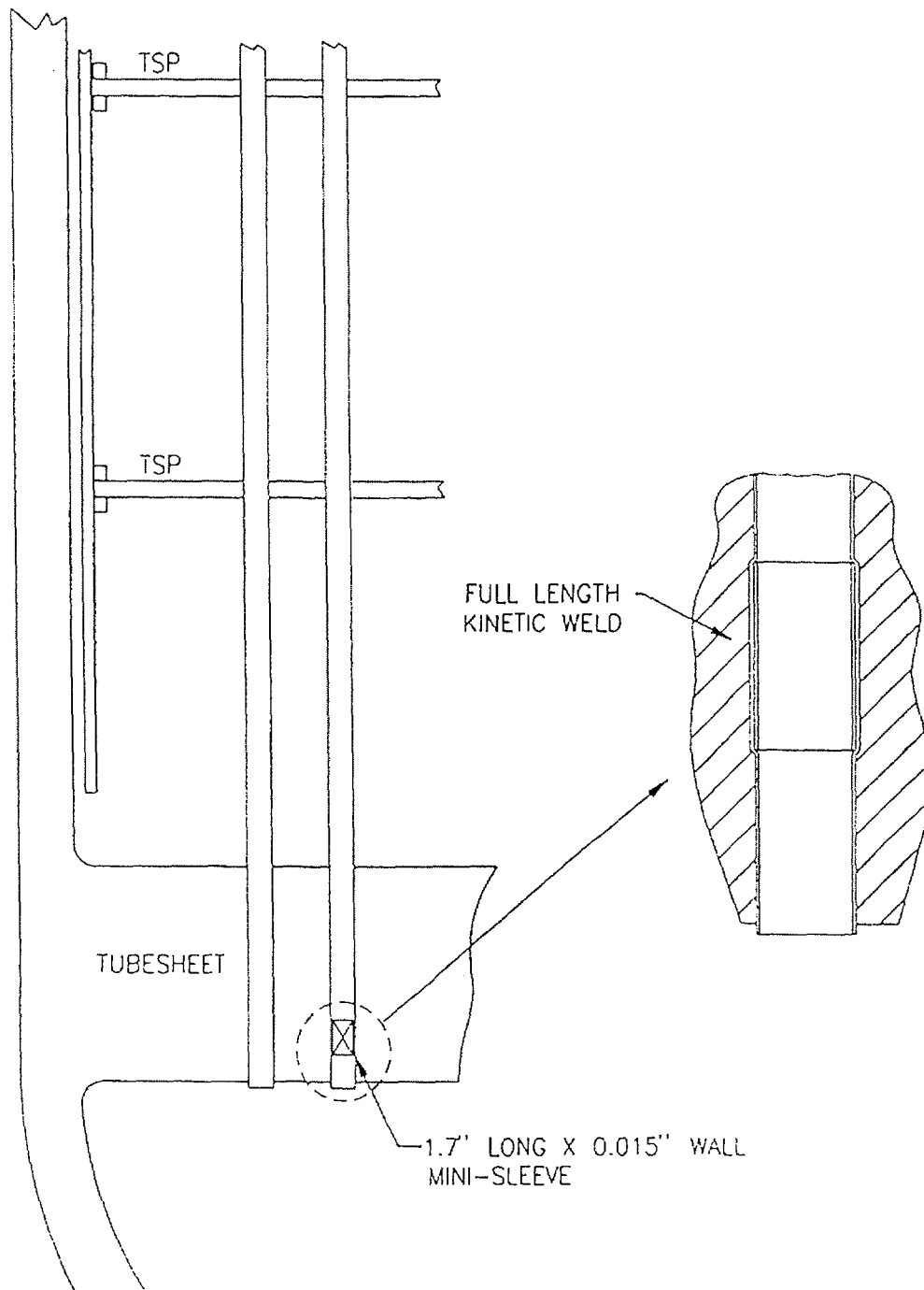


Fig.4-7 FTI Mini Sleeve.

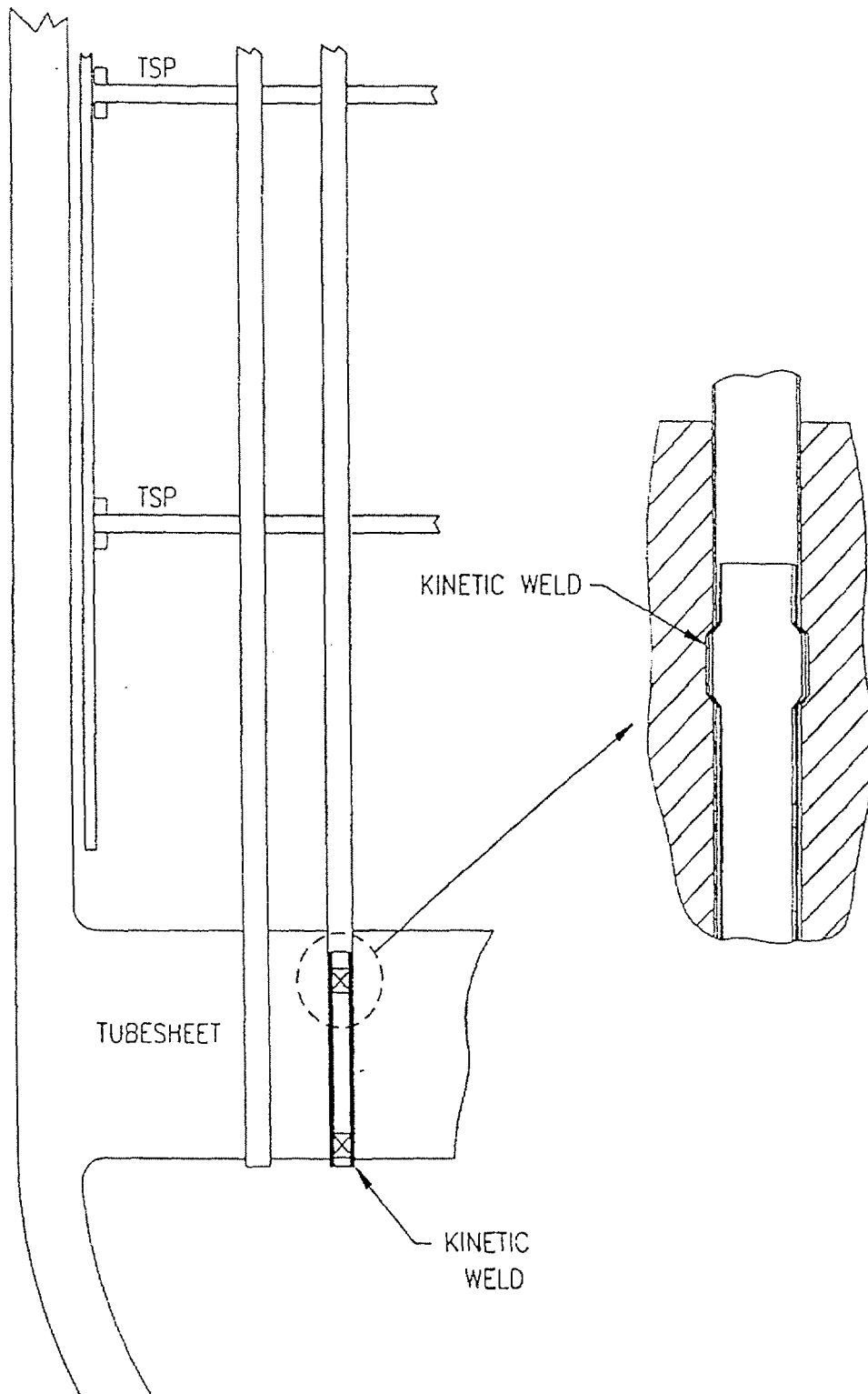


Fig.4-8 FTI Kinetic Tubesheet and Tube Support Plate Sleeve.

3. Westinghouse

웨스팅하우스는 1980년 이후 17개 이상의 발전소에 59000개 이상의 슬리브를 설치하였다. 웨스팅하우스의 슬리브 기술로는 PWSCC 민감성이 낮은 전열관에 대해 적용되는 HEJ와 높은 전열관에 대해 적용되는 레이저 용접의 두 가지가 있다. Brazed 조인트가 사용되기도 하였으나, 현재는 사용되지 않고 있다.

가. Mechanical Hybrid Expansion Joint(HEJ)

Fig.4-9는 증기발생기 전열관에 대한 웨스팅하우스의 HEJ 보수법을 보여주고 있다. WC tipped Brush를 이용하여 1500rpm 속도로 전열관 내부를 클리닝한 후 슬리브를 삽입한다. Hydraulic Expansion 길이는 상/하부 각각 4inch이며, Tube Bulge은 최대 10mils로 제한되어 있으나 보통 4-7mils 정도로 행해진다. Hard Rolling으로 밀착 후, ECT 검사를 실시한다.

나. Laser Welded Sleeve

레이저 슬리빙의 장점은 1)환경에 대한 민감성이 낮고 2)2차측에 대한 영향이 적으며, 3)설치속도가 높은 점등이다. 레이저 슬리빙의 설치 절차는 다음과 같다. 1)전열관 내벽 클리닝 2)슬리브 삽입 3)상/하 조인트 확관 4)상부 레이저 용접 5)하부 레이저 용접 6)상부 열처리 7)상부 UT 검사, 상/하부 Endoscopic 검사의 순이다. Doel 3 발전소에 설치된 레이저 용접 슬리브에서 결함을 경험하였다.

Fig.4-10은 Tubesheet를, Fig.4-11은 Elevated Tubesheet를 웨스팅하우스의 레이저 슬리빙법을 이용하여 보수한 단면을 보여주고 있다. 슬리빙에 이용된 레이저는 1988년 Doel 3 발전소에서 CO₂ 레이저를 사용하였으며, 그 이후로 지금까지 Nd:YAG 레이저가 사용되고 있다. 그 이유는 CO₂ 레이저와 Nd:YAG 레이저에서 금속재질에 대한 흡수율의 차이로 인하여, 동일한 폭의 용접폭을 얻기 위해서는 CO₂ 레이저의 경우 더 많은 출력이 요구되기 때문이다. 또한, CO₂ 레이저는 다수의 반사경을 이용하여 빔을 용접부위까지 이송하지만, Nd:YAG 레이저는 광케이블을 이용하여 빔 이송이 가능하기 때문에 로봇 등을 이용한 자동화가 용이하다. Fig.4-12는 관지지판부에 웨스팅하우스의 레이저 슬리빙법을 이용하여 보수한 단면을 보여주고 있다.

웨스팅하우스에서 기존의 Laser Welded Sleeve를 개선하여 Laser Welded Direct Tube Repair 기술을 개발하였다²⁸⁾²⁹⁾. 이 방법은 레이저를 이용, 열화부를 전열관 두께의 30-80% 깊이로 용융하여 나선모양으로 중첩한다. 고 Cr 용가재 첨가로 용접금속은 고 Cr 미세조직을 갖는다. 용가재를 공급하는 방법은 용접하

기전 소모성 용가재를 사전 도포하거나 Filler Wire를 사용한다. 장점으로는 기존에 설치된 슬리브 위에 열화된 전열관을 보수할 수 있으며, 유속감소가 최소화된다. 특히 슬리브 길이의 축소(보통 1inch)는 증기발생기에 대한 열 수력 Performance 충격을 최소화시킨다.

다.Laser Welded Direct Tube Repair

웨스팅하우스 또한 ABB CE사와 마찬가지로 레이저를 이용한 Direct Tube Repair 기술을 개발하였다. 용가재를 첨가하는 방법으로 Filler Wire 또는 가용성의 삽입관을 이용한다. Direct Tube Repair 기술은 기술리브 윗 부분의 열화위치에도 보수가 가능하며, 최소 슬리브 길이가 거의 1inch에 가깝고, 유속감소를 최소화할 수 있는 장점이 있다.

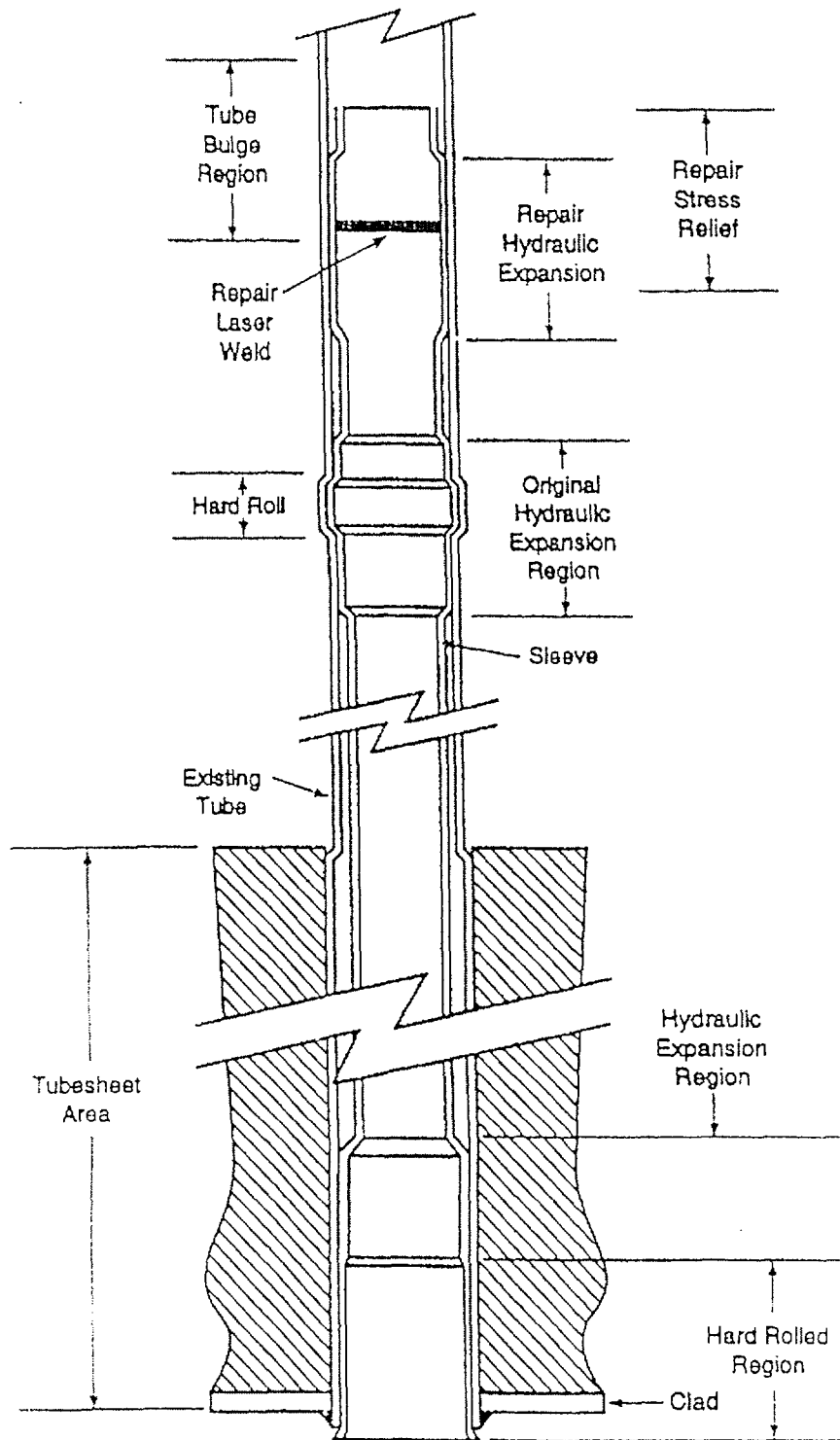


Fig.4-9 Westinghouse Hybrid Expansion(HEJ) Sleeve Installation.

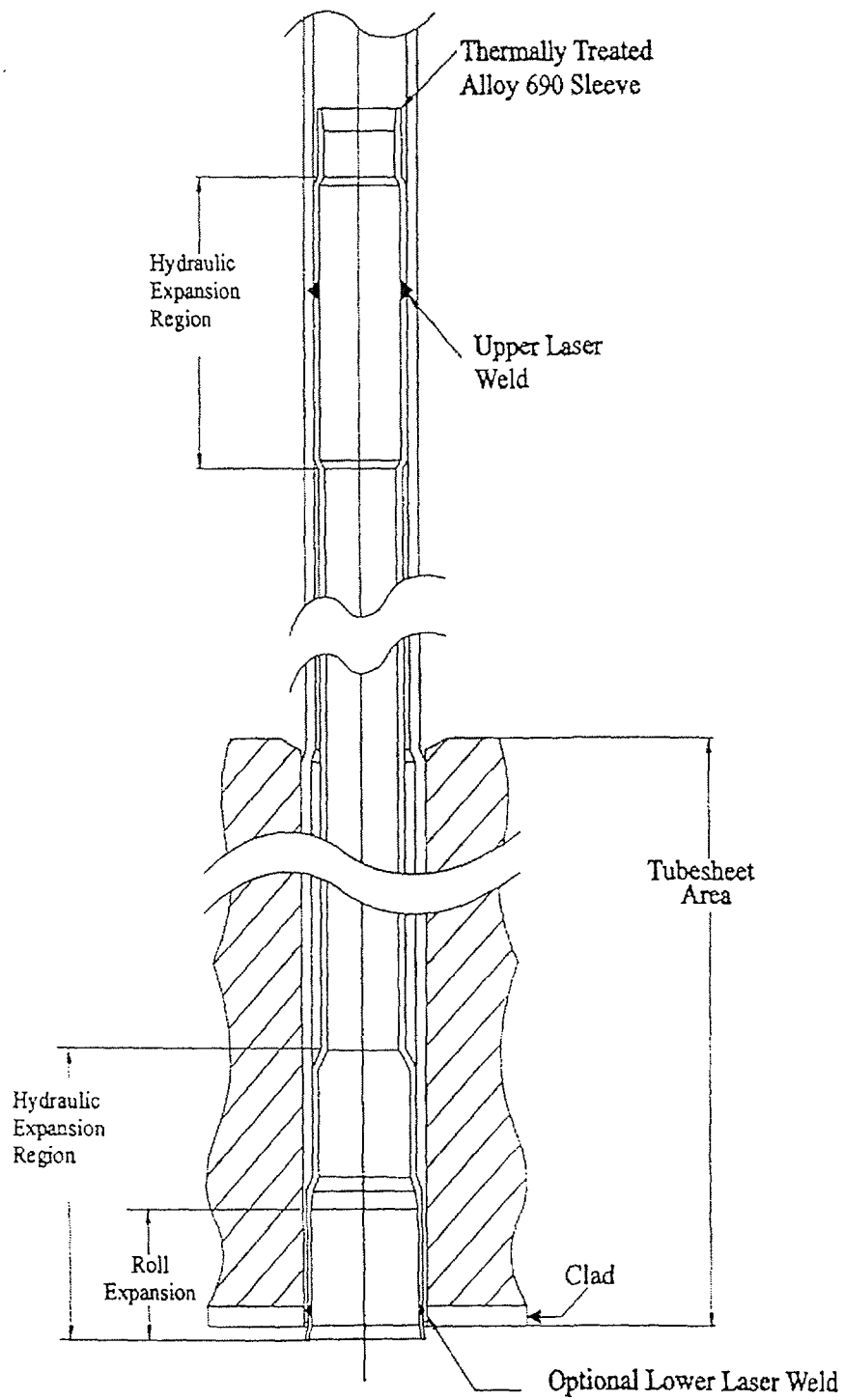


Fig.4-10 Westinghouse Laser Welded Tubesheet Sleeve Installation.

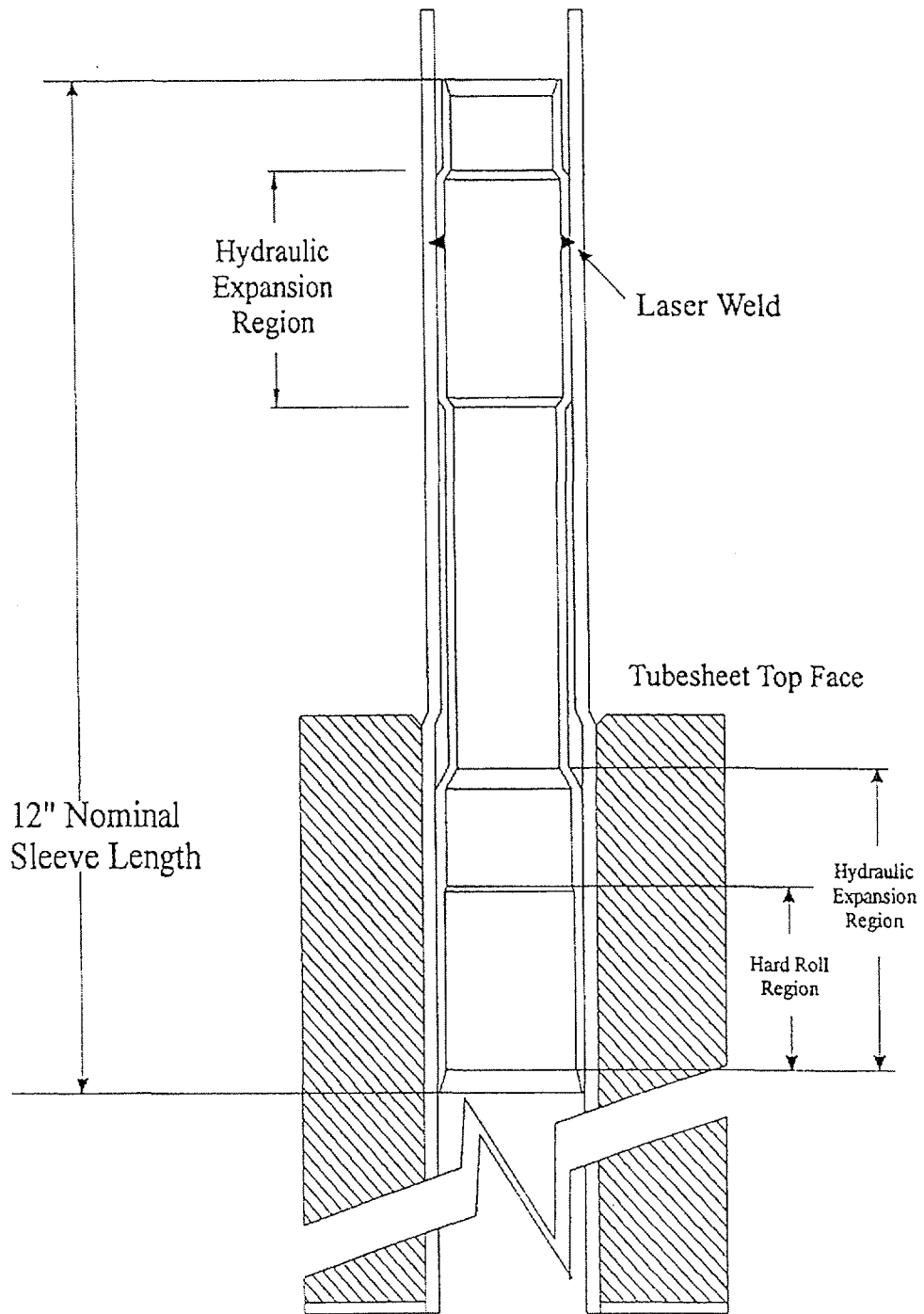


Fig.4-11 Westinghouse Laser Welded Elevated Tubesheet Sleeve Installation.

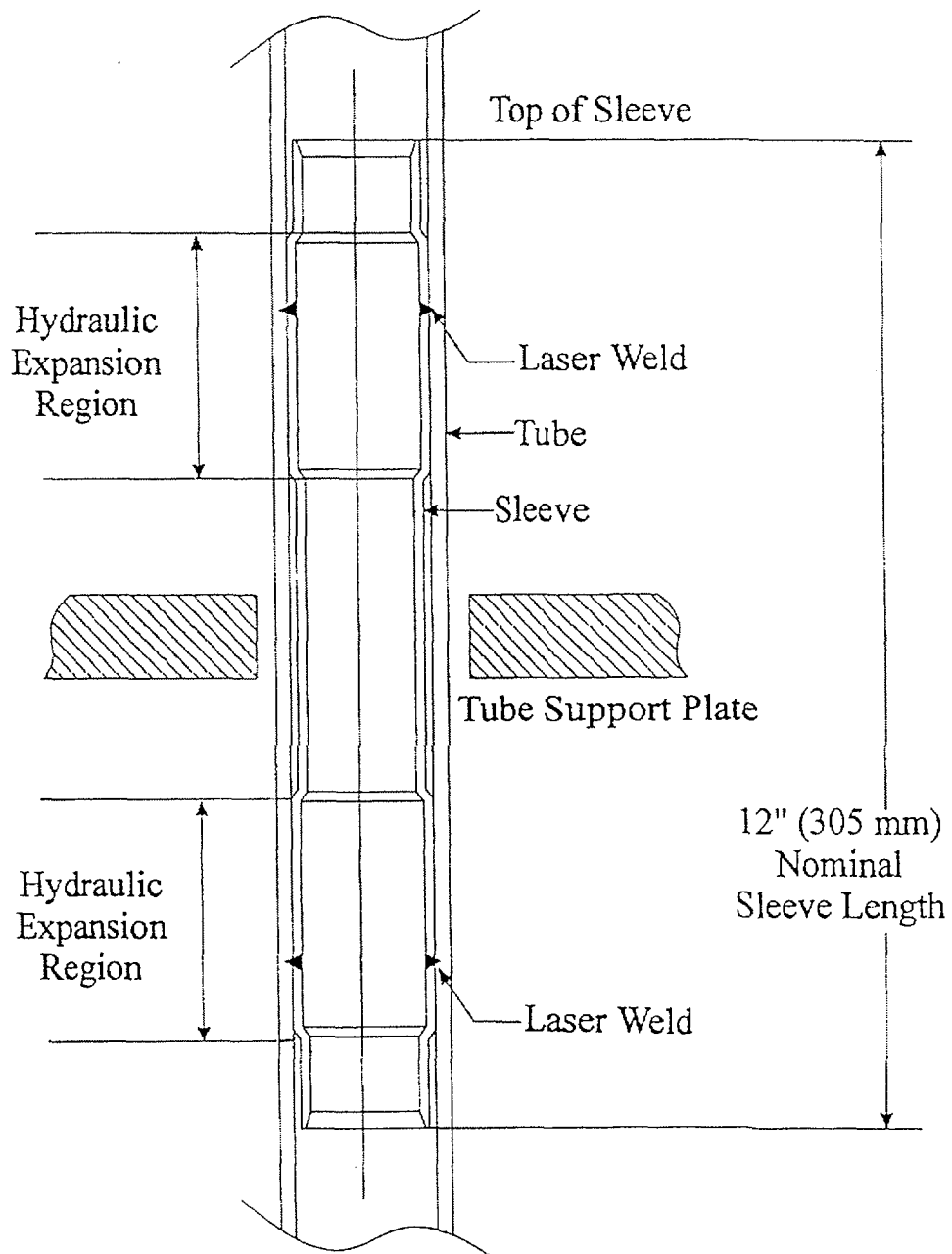


Fig.4-12 Westinghouse Laser Welded Tube Support Plate Sleeve Installation.

제 2 절 보수 기술

1. 기계식 슬리빙(Hydraulic expansion joining)

용접을 하지 않는 기계식 슬리브의 사용은 빠른 설치속도와 비교적 낮은 가격으로 인해 많이 선호하는 경향이 있다. 국부적인 팽창, 즉 Hybrid expansion 형으로 밀착된 상부 조인트에 의해 전열관 속으로 고정되어지며, 단기 수명이 요구되고 미국 내 발전소에서의 좋은 성능을 보여준다는 관점에서 추가적인 특수 검사를 하지 않고 기술제공자의 품질관리에 의존하는 것만으로도 무난하다고 판단되고 있다. 본 방법의 단점으로는 슬리브에서 균열이 발생되었다는 보고가 있고 이 문제를 해결하기 위해 처음 HEJ 부위에다가 레이저 용접을 하고 추가로 위에다가 HEJ 부위를 만들고 다시 레이저 용접을 함으로 보완하였다. 또한 Tubesheet에만 적용이 가능하다.

Fig.4-13은 웨스팅하우스사의 Hydraulic Expansion 확관법으로 전열관 및 슬리브에서 시간에 따른 압력변화로 변형상태를 나타내고 있다³⁰⁾.

2. 브레이즈 슬리빙(Brazed sleeving)

Brazing Filler 저장체인 슬리브에서 슬리브와 전열관 사이의 접촉표면을 Brazing용과 그 위에 새로운 압력경계를 생성용으로 주입하기 위하여 증착된 Brazing Filler가 녹을 때까지 가열한다. Brazed 슬리빙 절차는 우선 슬리빙 대상 전열관 내부표면의 이물질 제거한다. 그 다음 슬리브를 삽입하고 슬리브 위/아래 끝에서 유압 팽창시킨다. 전기 히터와 Brazing 장치를 삽입하고 Brazing하며, Brazing된 부위를 초음파검사와 와전류검사를 수행한다. 기계식 슬리빙방법으로는 적용하기 어려웠던 관지판에도 적용이 가능하다. 그러나, 전열관 시트의 하부 조인트에 있어서 Brazing법을 적용하기가 힘들어서 전열관을 확관시키거나 용법에 의해 기밀시키는 것이 요구되며, 수실 최외각의 2-4열은 적용이 불가능한 단점이 있다. 관련 특허는 참고문헌³¹⁾³²⁾을 참조 바란다.

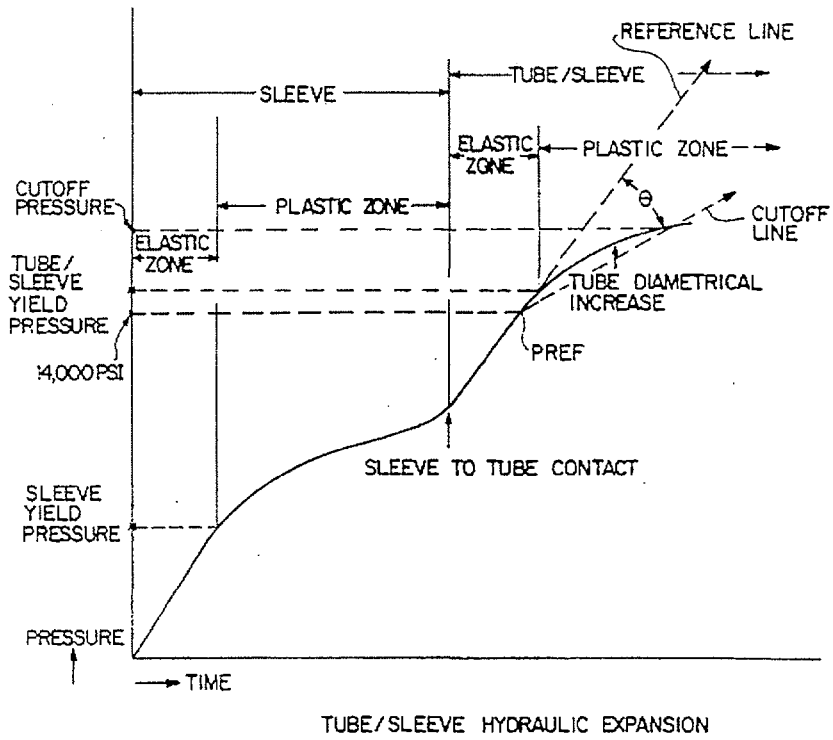


Fig.4-13 Tube/Sleeve Hydraulic Expansion.

3. 폭발 용접 슬리빙(Explosive Welded Sleaving)

폭발 용접은 전열관 항복강도의 수십배 이상되는 순간 초고압의 폭발압력으로 이종 또는 동종의 금속을 접합시키는 고상접합법의 일종이다.

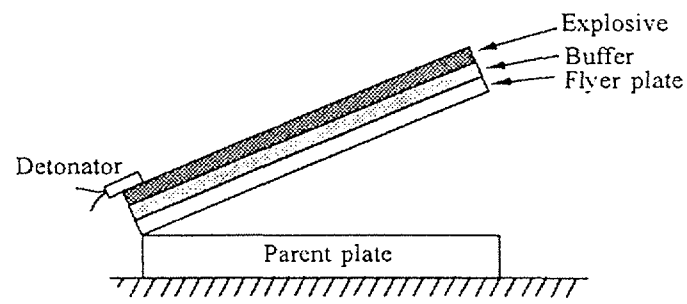
Fig.4-14에 나타난 바와 같이, 폭발 용접의 기본 원리는 접합할 두 금속을 서로 경사지게 놓고 그 위에 폭약을 장착해 폭발시킴으로써 발생하는 높은 폭발압력과 폭발에너지에 의해 두 금속을 접합하게 되며, 화약 폭발시 두 금속사이에서 발생된 제트가 접촉할 표면사이에 존재하는 Surface Atomic Layer 및 이 물질층을 제거하게 된다. 이로 인해 충돌점에서 두 금속 사이의 원자들이 서로 계면을 가로질러 Coherent Bond를 일으켜서 야금학적인 접합이 일어나게 된다. 이때 두 금속은 고상으로 거동하지 않고 액상과 같이 거동하게 되는데, 이는 폭발시 발생하는 비점성 유체로 거동하기 때문이다.

폭발 용접의 메카니즘인 제트를 일으키기 위해서는 1)충돌압력은 임계값을 초과해야 하며, 2)충돌지점에서 용접진행속도는 음속보다 작아야 한다. 앞의 두 조건을 만족시키기 위해서는 화약량/가속된 유효질량값(c/m), 유효거리(Stand-off Length), 유효각도((Stand-off Angle), 폭발속도(Detonation Velocity) 및 관관 홀 직경 등의 Ligament에 대한 전열관의 임계두께(t) 등과 같은 변수가 균형을 이루어야 한다. 일반적으로 상기 인자들은 Fig.4-15에 나타난 충돌각과 충돌속도와의 관계에 의해 나타낼 수 있다. 곡선 A는 폭발력에 의한 접합이 형성될 수 있는 최소 충돌 압력을 나타내며, 충돌각이 감소할수록 높은 압력이 요구됨을 알 수 있다. 곡선 B는 최대 충돌 압력을 나타내는 곡선으로서 충돌점 속도와 충돌각이 매우 큰 범위에서는 충돌계면이 용융되어 용융계면층이 형성되는 것으로 보고되고 있다. V_T 는 폭발용접이 가능한 최소 충돌속도를 나타내며, V_S 는 아음속 폭발속도로서 위에 언급한 폭발제트를 형성하기 위한 조건을 나타낸다.

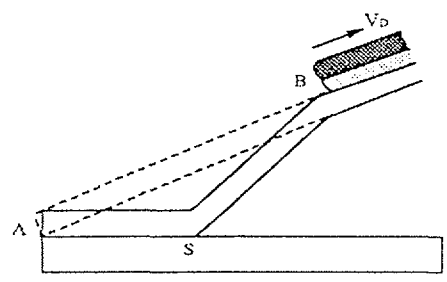
폭발 슬리브의 두께는 1.2~1.4mm가 적절하며, 슬리브의 외면에 깊이 0.3~0.4mm의 홈을 형성하면 동일한 화약량에서도 운전가능 내수압이 상승한다. Explosive Welded Sleaving은 폭발 슬리브 주변 Ligament 형태에 따라서 보수 방법을 다르게 하여야 한다. 즉 관관부, 관관 상부의 90mm 이내 부분, 관지지판부의 열화 원인 및 형태에 따라 보수 방법을 다르게 한다. 유체에 의한 마모, SCC 등으로 인하여 전열관 최초의 항복강도의 50%이하(15kg/mm^2)이면 Explosive Welded Sleaving만으로는 불가능하므로 폭발 확관후 레이저 용접을 실시하는 방안을 채택하여야 한다. 관관, 관관 직상 90mm까지는 홈을 가진 슬리

브로 폭발 확관후 750~800℃에서 15min동안 응력제거 열처리하면 Sleaving의 인발강도는 1500~2300kg의 범위로 내수압 250kg/mm²이상으로서 만족한다. U-bend에 결함이 있는 전열관은 플러깅하여야 한다.

Fig.4-16의 (a)는 관관부, (b)는 관지지판부, (c)는 그외 열화위치에 대한 슬리브 기술을 나타내고 있다.



(a)



(b)

Fig.4-14 Mechanism of the Explosive Welding; (a)The Basic Setup before the Explosive is detonated, (b)The Position When the Detonation Front, Which Travels at Velocity V_D , has reached B and the Collision Point has reached S.

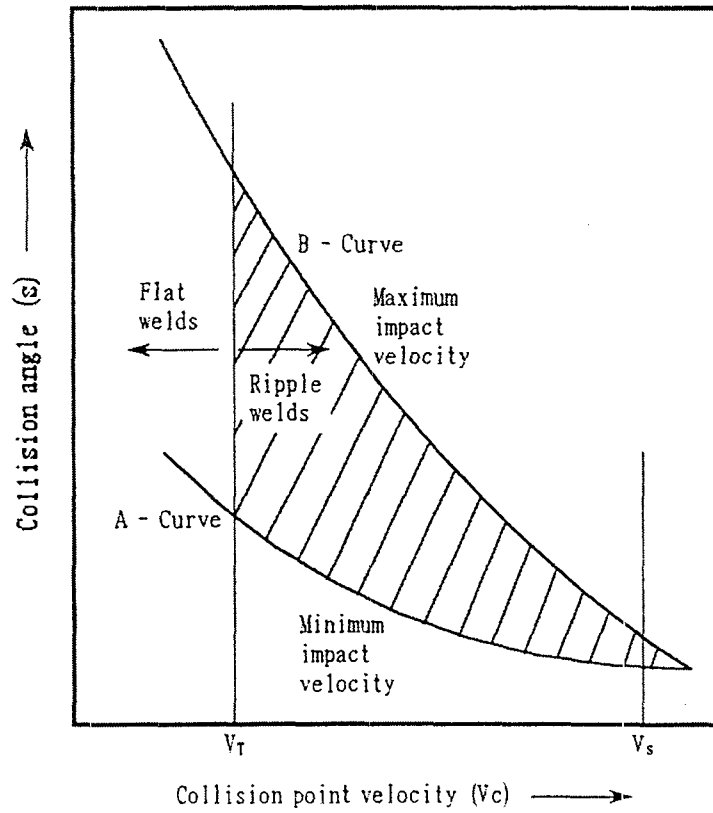


Fig.4-15 Boundaries for Explosive Welding.

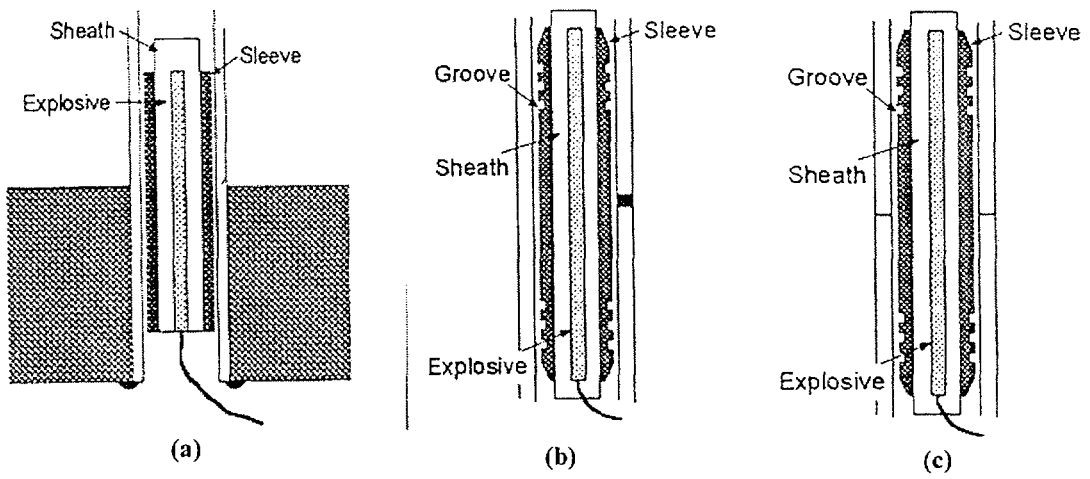


Fig.4-16 Explosive Welded Sleeve; (a) Tubesheet, (b) Tube Support Plate, (c) Others Degraded Position.

4.레이저 용접 슬리빙(Laser welded sleeving)

원자로 격납용기 밖에 설치된 고출력 Nd:YAG 레이저 발생기를 사용하여 좁은 Bead 폭을 가진 좋은 용접이 가능하며, 광섬유를 따라 레이저 에너지가 전달되기 때문에 어떠한 위치에서도 용접이 가능하고, 반사경의 나선회전에 의해 전열관의 Girth(원주방향) 용접이 가능하다. Fig.4-17은 레이저 용접법에 사용되는 Laser Weld Head를 보여주고 있다.

Brazing 법에 비해 우수한 점은 첫째, 슬리브의 길이를 줄일 수 있는데 그 이유는 전열관 시트속으로 빠져가는 열을 고려할 필요가 없기 때문이다. 참고적으로 슬리브의 길이는 Brazing은 280mm, Laser Welding은 150mm이다. 이런 장점 때문에 수실의 최외각에 있는 첫 번째 Row를 제외하고는 모든 전열관을 슬리빙할 수 있다. 둘째, Brazing 공정은 상하부 조인트가 서로 다른 기술이 요구되지만 본 방법은 전열관 시트의 상부와 마찬가지로 하부 조인트에도 적용하여 자연스럽게 효율을 개선시킬 수 있다. 셋째, 레이저가 자체가 갖고 있는 특성으로 용접부의 HAZ(heat affected zone)가 좁고, 최소한의 입열량으로 비틀림이 적다. 그러나, ASME가 요구하는 용접폭을 만족하기 위해서는 최소한 3pass 이상 용접이 수행되어야 하며, 용접깊이는 전열관 두께의 85%이하로 제한되어야 한다. Table 4-1은 용접에 영향을 미치는 인자와 조건을 나타내고 있다

단점으로는 급속한 응고속도로 인한 응고균열에 민감하며, 전열관의 미세조직이 변화하게 된다. 또한 응고 수축시 고인장응력이 용접부에 잔류하게 되므로 용접후 응력제거 열처리가 반드시 수행되어야 한다.

Table 4-1 Weld joint design and influencing parameter.

Weld joint design	Influencing parameter
<ul style="list-style-type: none"> ○Weld width(3pas, ASME required) ○Weld free of crack and inclusions ○Weld depth less than 85% of tube wall thickness ○Weld surface amenable to UT inspection 	<ul style="list-style-type: none"> ○SG tube material deviations ○Tube ovality ○Heat treatment after welding ○Moisture on the primary or secondary ○Tube OD deposit(sludge) ○Tube OD water

이 방법은 Intergranular Attack을 지닌 전열관에 대해 예방보수작업으로 널리 적용되고 있다. 주요 작업절차는 슬리브를 삽입하고, 슬리브의 상부와 하부에서 유압 확관시킨 후 YAG 레이저에 의한 레이저 용접을 수행한다. 그 다음 표면 비드폭에 대한 육안검사와 슬리빙 위치에서의 와전류탐상을 수행하여 건전성을 확인한다. 레이저 용접 슬리빙에 관련한 특허는 참고문헌33)34)을 참조하기 바란다.

Laser Weld Head

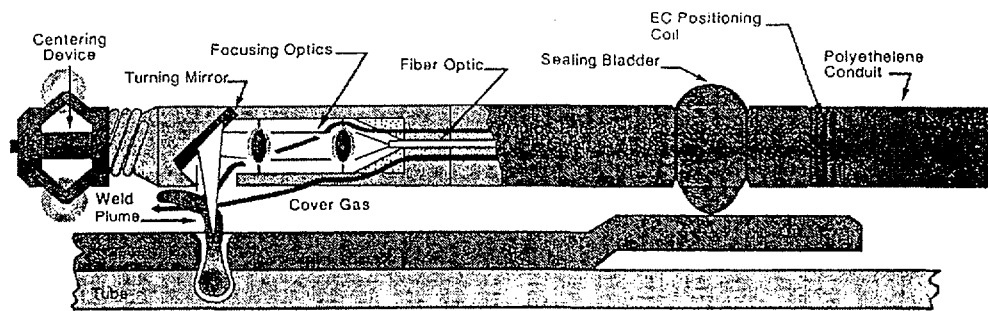


Fig.4-17 Laser weld head for repair of steam generator tube.

5. PLUSS 슬리빙

ABB CE사에서 개발된 슬리빙 방법으로서 일반적으로 사용되는 용접식 슬리빙이 가지고 있는 설치 높이의 한계, 민감한 용접공정, 결정적인 용접 경로 공정, 전열관 검사의 신뢰도 저하 등의 제약조건을 개선할 목적으로 개발되었다. 앞에서 언급한 제약조건을 피하기 위해 ABB CE사는 단순 기계팽창 공정을 적용함으로써 무용접 슬리브(PLUS sleeve)의 개발을 시도하였으며, 이론적 검토와 가능성 시험을 통하여 증기발생기 전열관 보다 항복강도는 낮고 열팽창계수는 높은 슬리브 재료를 사용함으로써 누수방지 팽창 조인트를 얻을 수 있었다.

Fig.4-18은 PLUS 슬리빙 방법에서 공정 단계에 따른 Stress & Strain Curve를 나타내고 있다. 단계 A에서 슬리브가 확관되어지기 시작하며, 단계 B에서 슬리브는 탄성영역을 벗어나 소성영역에 들어서고, 전열관도 확관되어지기 시작한다. 전열관이 탄성영역을 지나기 바로 전에 확관을 멈추면 탄성응력에 의해 제자리로 돌아갈려는 힘이 발생한다(단계 C). 따라서 단계 D에서 잔류응력은 미소한 인장응력이거나 압축응력이 형성되게 된다. 이와 같이 전열관의 탄성응력이 확관된 슬리브를 잡아주는 것을 기본 이론으로 하고 있다.

Fig.4-19는 PLUS 슬리빙을 이용하여 TS(tubesheet)와 TSP(tube support plate)를 보수한 단면을 보여주고 있다. (a)의 경우, 슬리브관 상단부는 수압팽창법을 사용하여 6개의 연결부를 만들고 하단부는 Hard Rolling으로 연결하였다. (b)의 경우, 상단부 및 하단부 모두 (a)의 상단부 연결법과 동일한 연결법을 사용하였다.

Fig.4-20은 슬리빙하기전과 후의 국부적인 온도변화를 나타내고 있다. 슬리빙하기전의 전열관 안쪽 온도는 315℃를 나타내나 슬리빙 후에는 슬리브와 0.32mm Gap으로 인하여 약 30℃정도가 낮은 285℃를 나타내고 있다. Hard Rolling 부분의 바로 윗부분은 0.51mm의 Gap를 나타내고 있어 이러한 Gap에서 Crevice Corrosion 가능성에 잠재할 것으로 예상된다.

슬리브 재료에 있어서 증기발생기 운전 조건을 검토해 본 결과, I600 전열관 보수에 있어서 슬리브 재료로서 Incoloy 800을 선택하였다. Table 4-2는 PLUS 슬리빙이 적용된 원전을 나타내고 있다. 국내의 경우 1996년 고리 1호기, 1999년 울진 1호기, 2000년 울진 2호기에 성공적으로 설치하였고, 외국의 경우 벨기에에서 1996년 Tihange 3호기, 1997년 Tihange 2호기에 본 방법을 적용하였다.

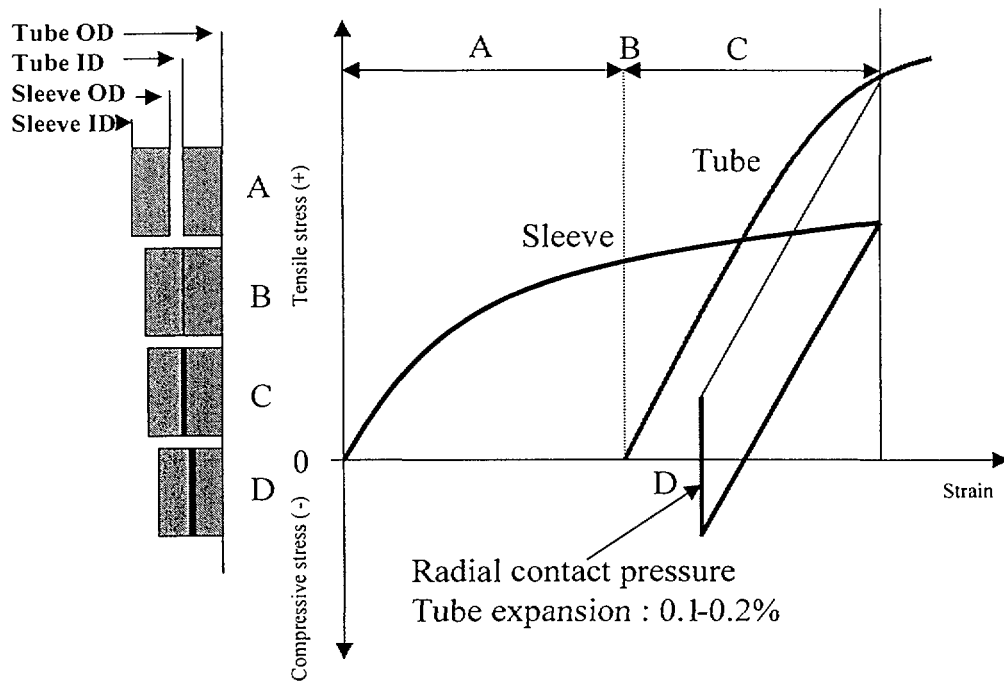
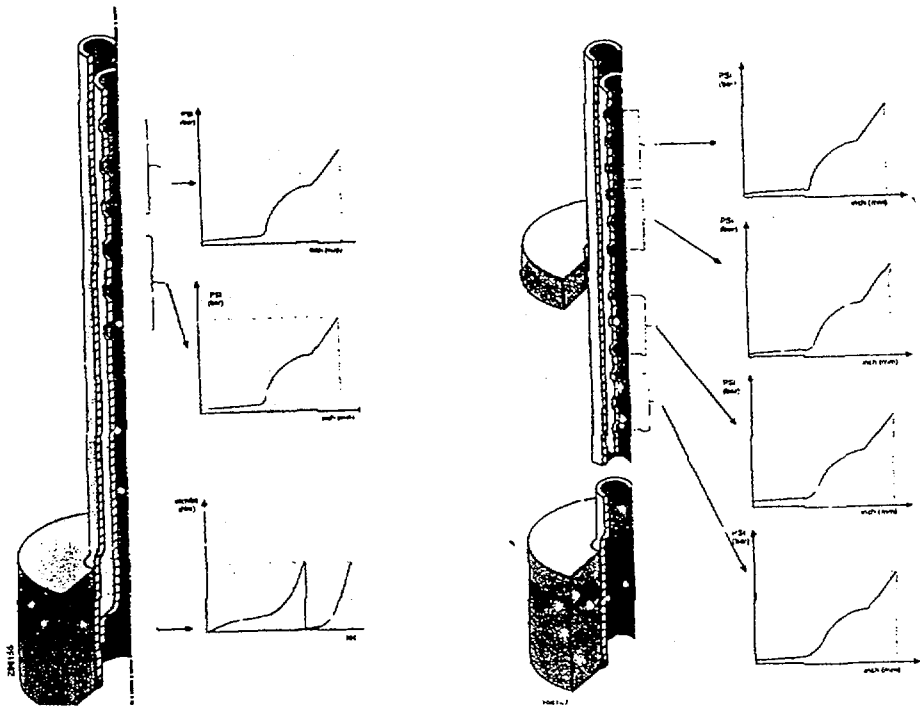


Fig.4-18 Stress/strain diagram of sleeve and tube.



(a) (b)
 Fig.4-19 PLUS sleeve (a) TS (b) TSP.

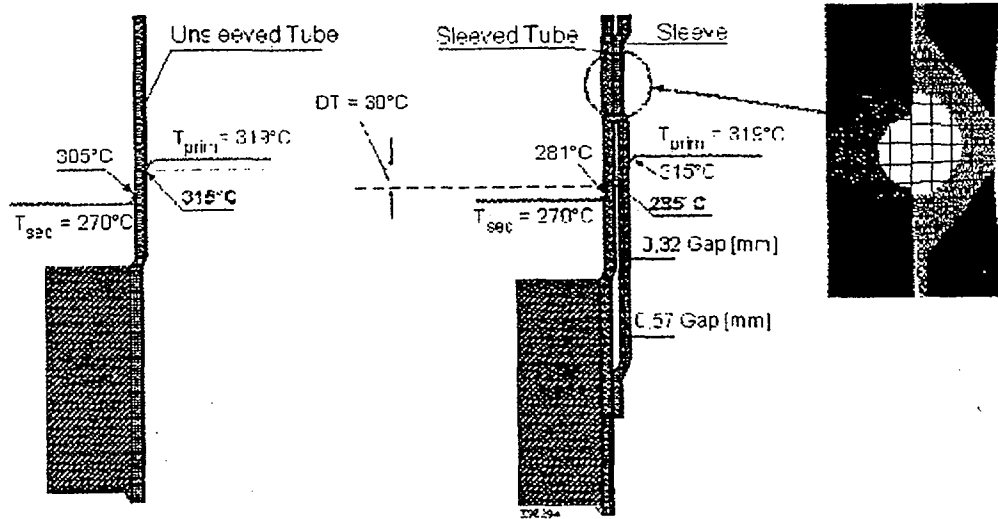


Fig.4-20 Temperature investigation unsleeved/sleeve tube.

Table 4-2 Installed PLUS sleeves.

Nuclear Power Plant	Steam Generator Type	Year	TS	TSP	Subtotal
Tihange 3, Belgium	WE1, 3/4" Tubes	1995	20	-	20
Kori 1, Korea	W51, 7/8" Tubes	1996	1205	-	1205
Tihange 3, Belgium	WE1, 3/4" Tubes	1996	104	-	104
Tihange 2, Belgium	W51, 7/8" Tubes	1997	10	-	10
Krsko, Slovenia	WD, 3/4" Tubes	1998	46	89	135
Ulchin 1, Korea	W51, 7/8" Tubes	1999	986	-	986
Krsko, Slovenia	WD, 3/4" Tubes	1999	78	32	110
Ulchin 2, Korea	W51, 7/8" Tubes	2000	1235	-	1235
Tihange 2, Belgium	W51, 7/8" Tubes	2000	No. of sleeves not yet decided	-	No. of sleeves not yet decided
Calver Cliff	CE, 3/4" Tubes	2000	No. of sleeves not yet decided	-	No. of sleeves not yet decided
Total		1995 -2000	3685+	121	3806+
TS : TubeSheet, TSP : Tube Support Plate					

슬리브를 삽입하는 방법들은 전열관과 슬리브의 조인트 제작방법에 따라 차이가 있긴 하지만 슬리브를 삽입함으로써 냉각수 유속과 열전달 효율이 감소하게 되며, 전열관과 슬리브 사이의 Gap이 존재하므로 Crevice에 민감한 단점은 다른 슬리빙 방법과 마찬가지로 존재한다. Table 4-3은 여러 가지 보수법에 대한 설치효율과 슬리브의 길이를 보여주고 있다. PLUS 방법의 다른 두 방법에 비하여 빠른 설치 속도를 갖는 반면, 슬리브 길이는 긴 것을 알 수 있어 상대적으로 열전달 효율과 유속 감소가 클 것으로 생각된다.

Table 4-3 Efficiency, Length, Applicable Area and Sleeves/Plug Ratio as a function of S/G Tube Repair Techniques.

Location	Brazed		Laser welded		PLUS		Electrosleeving	
	TSP	TS	TSP	TS	TSP	TS	TSP	TS
Efficiency (sleeve/day)	20	6	32	22	45		48	
Not applicable (row)	2-3	3-4	1	1-2				
Applicable(%)	83	78	97	95	100	100	100	100
Sleeve length(mm)	280		150		400	570		
Sleeve/Plug ratio					40		180	

6.일렉트로슬리빙(Electrosleeving)

가.전주법(Electroforming)

(1)전주법의 이해

전기도금법(electroplating)을 응용한 전기주조법(electroforming)은 전기도금을 통하여 원하는 형상의 제품을 제작하는 일종의 가공법으로 1837년 러시아의 과학자 야코브(Jacobi)에 의해 개발되었다. 전기도금법은 장식 및 부식방지를 목적으로 한 얇은 코팅인 반면, 전주법은 구조재료로 사용되므로 그 두께가 두껍고 공정의 마지막 단계에서 이형작업이 첨가된 점이 다르다. Electrosleeving 방법은 전주법과 유사하나 이형작업이 제외된 점이 전주법과 다르다.

전주법은 주형 혹은 매트릭스로도 불리는 맨드릴을 원하는 피복재료로 전기도금한 후, 맨드릴을 제거하면 피복물 자체가 제품이 되는 기술이다. 복잡한 형상들도 이 방법으로 제작이 가능하며, 벽두께도 0.025mm 정도까지 얇게 할 수 있다. 제품의 무게도 몇 그램으로부터 270kg에 이르기까지 광범위하다. 전기주조법은 생산량이 아주 적은 경우와 니켈, 구리, 금, 은으로 제작이 까다로운 제품들(주형, 다이, 도파관, 노즐, 벨로우즈)의 제조에 적합하며 항공우주, 전자, 광학분야 등에 널리 응용되고 있다. 여러 개의 맨드릴을 사용함으로써 생산속도를 증가시킬 수 있다.

(2)고속도 도금³⁵⁾

전기도금에서 전착 반응이 진행하면 음극면에서의 금속이온은 소비되므로 음극부근에서의 금속 이온농도는 점차 저하되어 확산층이 생긴다. 전극면으로부터의 농도구배가 직선이라고 가정하고 이 두께를 δ_N 이라고 나타내면 이 층을 Nernst의 확산층 두께라고 부른다. 물질의 이동이 확산만으로 이루어지고 있다고 하면 다음 식 (1)이 성립된다.

$$i = nF \frac{D(C^0 - C_{x=0})}{\delta_N} \quad (1)$$

i 는 전류밀도, D 는 금속이온의 확산정수, C^0 는 용액본체의 농도, $C_{x=0}$ 는 전극면의 농도, n 은 이온가, F 는 패러데이 상수이다. 전류밀도 i 를 높이면 $C_{x=0}$ 는 점점 적어지며 나중에는 제로로 된다. 이때의 i 의 값을 i_l 이라고 하면

$$i_l = \frac{nFDC^0}{\delta_N} \quad (2)$$

로 되면 이 i_l 를 확산지배의 경우에 한계전류밀도이며, 이 이상의 전류밀도를 크게 해도 반응하고자 하는 이온이 음극면에 없게 되므로 다른 이온의 전착반응

이 생겨서 목적이온의 전류효율은 저하될 뿐이다. 일반적인 전기도금은 물질이동 과정에 의해 지배될 때가 많으므로 이런 경우 높은 i_d 를 얻는 방법을 생각하면 도금속도를 높일 수 있게된다.

이와 같은 방법에는 1)확산정수 D 가 큰 염을 사용하거나, 2)금속이온의 농도 C^0 를 크게 해주며, 3)높은 온도의 액 사용, 4)액의 교반(공기, 순환), 5)고주파 펄스전류를 사용하는 방법 등이 있다.

나.일렉트로슬리빙(Electrosleeving)

1992년 초에 CANDU 형 Pickering B Unit 5 발전소에서 Pitting의 국부적인 집중과 급속한 결함 진전으로 슬리브 조인트 영역에서 누설을 경험하였다. 이로 인한 발전 중단으로 커다란 재정적 손실을 입게되어 Ontario Hydro사는 기존 슬리빙의 단점인 조인트부에서 용접 및 변형으로 인한 미세구조 변화, 슬리브 삽입으로 인한 열전달 효율과 유속감소를 최소화하기 위해 새로운 보수기술에 대한 연구를 시작하였다. 3년 후에 Electrosleeving기술을 개발하여 1994년과 1995년에 각각 Pickering Unit 5, Osonee Unit 1에 시험적인 설치를 하게 되었다.

Fig.4-21에서 보는 바와 같이 전주법을 이용한 Electrosleeving은 누설을 완벽하게 차단하고 열전달 손실을 무시할 정도의 완벽한 Bond를 형성할 뿐 아니라 냉각재 흐름의 감소가 적어 부드러운 천이영역을 만들고 균열 위에 장착할 수 있는 완전한 구조적 보수작업이다. 또 특이할 만한 점은 전기주조된 전주층이 나노구조를 가지고 있다는 점이다. 재료분야에서 21세기는 나노기술의 시대라 할만큼 나노재료에 대한 요구가 급증하고 있다. 이것은 Hall-petch 방정식에서 알 수 있는 것처럼 입계 크기가 감소할수록 강도가 증가하며, 다른 방식으로는 얻을 수 없었던 인성증가를 동시에 얻을 수 있기 때문이다³⁶⁾³⁷⁾. 다른 슬리빙 방법에 비해 다음과 같은 장점이 있다(Table 11).

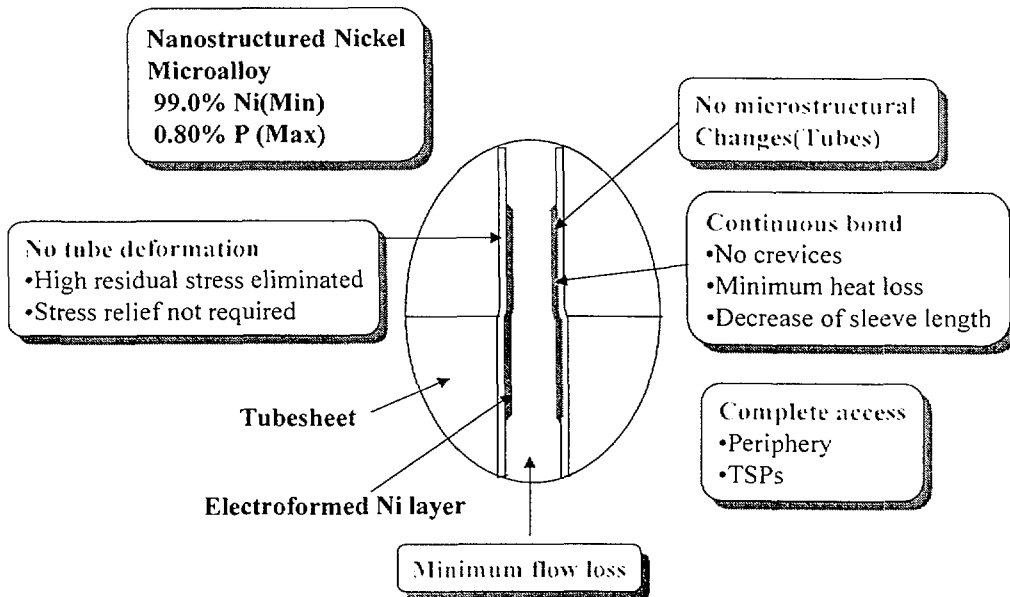


Fig.4-21 Advantage of electro sleeving using electroforming.

Table 4-4 Advantage and feature of electrosleeving.

- | |
|------------------------|
| ◇ 차기 보수를 위한 접근성 양호 |
| ◇ 전열관의 미세조직 불변 |
| ◇ 틈새없는 연속적 결합 |
| ◇ 완벽한 접근이 가능 |
| ◇ 냉각재의 유속감소가 적음 |
| ◇ 높은 잔류응력제거 |
| ◇ 슬리브관 삽입 불필요 |
| ◇ 기계적 강도 우수 |
| ◇ 저온 작업 |
| ◇ 위험성 없는 설치 작업 |
| ◇ 설치높이에 관계 무 |
| ◇ 기존에 설치된 슬리브관 보수도 가능 |
| ◇ 초음파 탐상에 의한 완벽한 결합 탐지 |

본 방법의 작업순서는 우선 산화물 등을 제거함으로 슬리빙 대상 전열관을 깨끗하게 한다. 그 다음 전기주조(Electroforming) 탐침을 삽입하여 산세작업, 공동형성, Sealing 확인 후, 부동태피막을 제거하기 위한 활성화 작업을 실시한다. I600의 경우는 부동태피막이 단단하므로 용액을 순환시키면서 역전류를 인가하여 제거한다. 그 다음 재산화 방지를 위한 니켈 층을 급속히 형성한 다음, 니켈 슬리브를 전기주조한다. 마지막으로 전기주조 탐침을 제거한다. 응용에 있어서 한 가지 슬리브 설계로 한국내 모든 증기발생기 형에 적용이 가능하고 원주방향과 모든 전열관 시트에 완벽한 접근이 가능하다.

본 방법에 대한 안정성을 확인하기 위해 RES(The office of Nuclear Regulatory Research)에서 Electrosleeving 방법으로 보수한 증기발생기 전열관을 시험하였다. 설계 기준 조건하에서 전열관의 기계적 성질과 부식특성 보다 Electro-sleeve 재료가 훨씬 좋게 나타났다. 그러나 가혹조건 성능(주로 고온)에 대한 의혹이 제기되었는데 구체적인 내용으로는 미세입자를 지닌 Electro-sleeve 재료는 600도 이상의 고온에서 기계적 성질이 저하되기 쉽다는 것으로 열유도 SG 튜브 파단에 대하여 전열관보다 Electro-sleeve로 보수된 SG 튜브가 민감도가 높다는 것이다. 재료문제를 해결하기 위하여 RES는 가혹조건의 시험시설(고온 고압과 누설 시험시설)을 보유하고 있는 ANL과 공동으로 연구를 수행하는

중으로 발전소 현장적용에 대한 기술적 근거를 마련하고 있다.

전주층이 나타내는 재료특성에 대하여 보고된 자료를 바탕으로 알아보겠다.

재료특성(Material Properties) : 평균입자 크기가 100nm의 나노구조로 99.5% 이상의 Ni과 고온에서 열적 안정성 유지를 위해 3000ppm이하로 첨가된 P으로 구성된다. 전주층의 두께는 0.75mm로 구조적 특성을 나타낸다.

기계적특성(Mechanical Properties) : Table 4-5에서 알 수 있는 바와 같이 YS와 UTS는 상업용 순수 Ni의 2배정도 그리고 Alloy 400 및 600에 비해서도 우수한 강도를 나타낸다. 연성과 Sleeve/Tube 응착 시험인 180° Reverse U-bend 시험 결과에서도 균열과 이탈이 발견되지 않았다. 피로특성은 상온에서는 순수상용 Ni과 유사한 특성을 나타내고, 고온(300℃)에서 0.5-25Hz에서 좋지 않은 결과를 보였다고 보고된다³⁸⁾. Creep 특성은 Constant Load 180-450MPa, temp 288, 315, 343℃에서 실험한 결과, 입계크립균열은 없었으며, 입계크기가 작아질수록 고정적 크립속도 증가하나 나노결정구조는 이에 대한 저항력이 우수한 것으로 나타났다³⁹⁾.

Table 4-5 Mechanical properties.

Properties	Value at 25℃				
	Pure Ni	Inocnel600 MA	Inconel690 MA	Electroforming layer	
				25℃	350℃
YS(MPa)	103	300	328	690	620
UTS(MPa)	403	718	766	1100	760
Elongation(%)	50	33	38	>15	
VHN				320-400	
Young Modulus(GPa)	207	207		214	

열적안정성(Thermal Stability) : Fig.4-22는 343℃에서 열처리 시간에 따른 경도값을 나타낸다. P이 미소량 첨가된 나노니켈의 경우는 경도값이 21일이 경과

한 이후까지도 일정한 반면, P가 첨가되지 않은 나노니켈은 급격한 경도 감소를 나타낸다. 이는 미소량 첨가된 P가 결정입계 성장을 억제하는 Zener Drag Effect를 나타내고, 순수 Ni의 나노 결정구조는 결정립 성장에 대한 구동력이 내재하기 때문에 열처리시 입계성장에 의하여 경도가 감소한다. P가 첨가된 경우에도 560~580℃부근에서는 급속한 입계성장을 보인다고 보고되고 있다.

부식저항성(Corrosion Resistance) : Ni 산화물은 낮은 pH, 높은 환원분위기, 고온에서 저항성이 약하다. 각 종류의 부식 저항성을 알아보기 위해 ASTM G28(IGA에 대한 민감성), ASTM G48(피팅, 틈부식), ASTM G35, G36, G44(Polythionic Acid, Magnesium, Chloride에서의 SCC 저항성, Sodium Chloride에 반복침수에 따른 SCC 저항성)의 규정에 따라 실험을 실시하였다. 실험결과를 알아보면 1)전주층의 특성은 순수 Ni에 비하여 우수한 내식성을 갖고 있으며, 연속적인 결합을 하고 있으므로 Crevice Corrosion에 우수한 저항성을 나타낸다. 그러나 Crevice Corrosion에 약간 민감하다는 보고도 있다. 2)산화성의 산성분위기에서 제한된 우수성과 알칼리성 및 그외 기타 분위기에 대한 우수한 저항성(증기발생기 가동조건에서 실험-온도,압력)을 나타낸다. 3)장시간 노출 실험에서 우수한 저항성을 나타냈으며, 산화성의 산성분위기에서는 제한된 우수성을 보였다. 4)C-ring 실험(10% sodium hydroxide solution at 350℃)에서 Crack Arresting 특성이 우수한 것으로 나타났다(Fig.4-23). 이는 Crack Shielding 효과에 의해 저장도의 균열은 고강도재료와의 경계면에서 Arrested 되는 것으로 분석된다⁴⁰⁾⁴¹⁾.

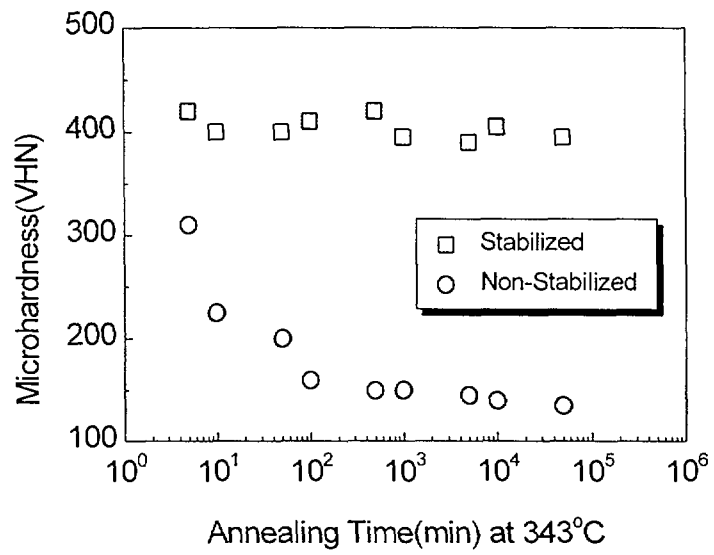


Fig.4-22 Effect of annealing time at 343°C on the Vickers hardness of both microalloyed and non-alloyed nano-Ni.

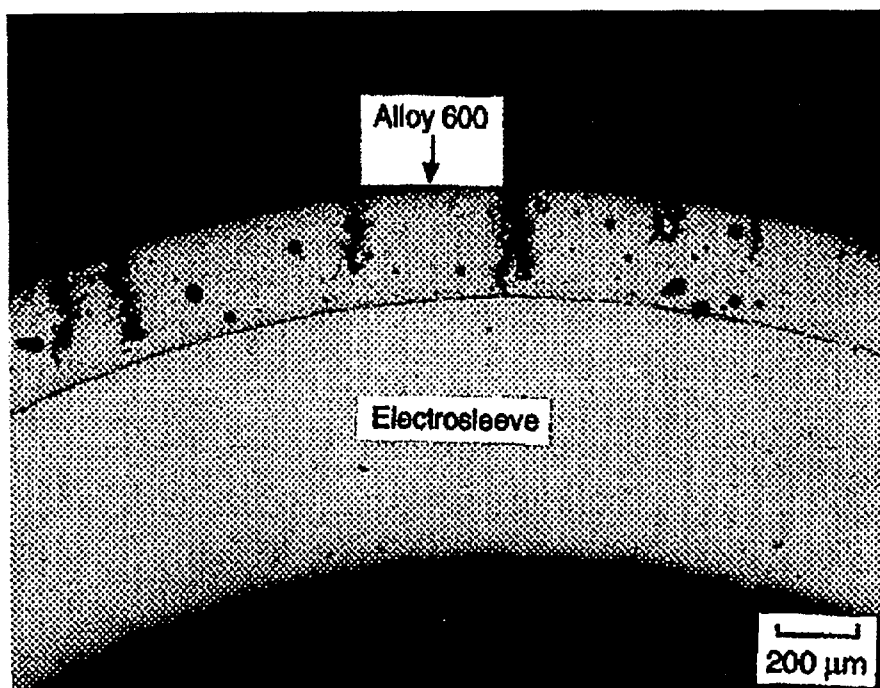


Fig.4-23 Cross section of a tube-electrosleeve following a SCC test. IGSCC is prevalent on the alloy 600 tube and stops at the interface.

다. Ontario Hydro사 특허 분석

전주법을 이용한 전열관 보수기술은 1986년에 이미 Framatome사가 특허를 출원하였으나⁴²⁾, 공정변수, 도금층의 합금종류, 그리고 첨가제에 대한 영향은 언급이 안되었다. Ontario Hydro사의 Electrosleeving 기술은 Fe, Cu, Ni-base Alloy의 열화된 전열관을 NiP합금으로 전기도금하여 0.75mm 두께의 도금층을 형성한다. 이 도금층은 미소경도 HV 200, YS 550MPa, UTS 690MPa, Elongation 10%이상의 특성을 나타낸다고 한다. 전기도금은 무전해 도금에 비해 높은 도금 속도로 인하여 경제성이 우수하기 때문에 NiP에 대한 전기도금연구⁴³⁾는 활발히 진행되고 있으며, 일본에서도 1997년 편홀이 없고 밀착성이 좋은 전기도금법을 개발하였으며⁴⁴⁾, 최근에 Nicholas가 알카리 용액을 통한 전기도금법이 개발하였다⁴⁵⁾.

Ontario Hydro사의 Electrosleeving 공정 중 탈지, 스트라이크 도금은 일반적인 도금공정과 유사하며, 전주공정은 Table 4-6에 나타나 있다. 전주공정은 25~90℃의 황산니켈과 설파민산니켈용액에 Pluse 또는 DC 전류를 10~1000Hz로 흘려주며, NiCO₃을 사용하여 용액내 Ni이온을 보충한다. 고온에서 입계성장을 억제하는 원소를 Pinning Agent로 정의하고 있으며 이 원소로는 Phosphoric, Phosphorous Acid, Molybdenum을 지정하고 있다. 첨가제는 계면활성제, 레벨러, Brightner로 각각 Sodium Lauryl Sulfate, Coumarin, Saccharin을 사용하며, 내식성 향상 원소로 Manganese Sulfate, Sodium Molybdate, Chromium Salt을 강화제 원소로는 Manganese Sulfate, Sodium Tungstate, Cobalt Sulfate를 지정하고 있다.

Fig.4-24의 (a)는 Ontario Hydro사의 Electroforming Probe를 나타내고 있다. 이 특허의 Probe에서는 보수하고자 하는 부분의 상하를 공압을 사용한 Inflatable O-ring과 Thermally Expandable O-ring을 사용한 Sealing의 방법을 통하여 도금 공간을 확보하였다. Inflatable Sealing과 Thermally Expandable O-ring을 통한 Sealing은 각각 최대 20, 100psi의 압력에 저항성이 있으므로 Thermally Expandable O-ring을 통한 Sealing이 우수한 특성을 나타내나 공정상 O-ring을 저온의 액체질소에 넣어 압축하는 과정이 추가되는 단점이 있다. 양극으로는 전주공정에 비소모적이며, 용액에 대한 내부식성을 갖는 Pt도금된 Ti를 사용하였다. 양극의 제조는 Ti와 Pt를 냉간가공한 후 구조적인 강도와 부식성, 연성 등을 고려하여 Ti에 Pt를 클레딩하였으며, Ti와 Pt가 각각 100 μ m~2mm, 50~250 μ m의 치수가 되도록 압출하였다. 용액순환 시스템으로 펌프, 밸브, 프로그래밍이 가능

한 모니터링 장치등을 구비하여 정확한 용액순환속도, 압력, 온도 등을 측정하였다. 용액순환시 도관이 매우 길기 때문에 용액에 의한 도관의 마모 손실이 크며, Probe 크기 축소가 어려웠다. 또한, Probe 크기를 축소하기 위해 출용 도관내에 입용 도관을 설치하였다. 출용 도관 직경을 입용 도관에 비하여 크게 하여, 도관의 마모 손실과 누수의 위험성을 줄였다. 이는 용액순환 속도와 도금속도를 증가시키는 결과를 가져왔다.

Fig. 4-24의 Electroforming Probe (b)는 (a)와 유사하나 도금용액에 Ni 이온을 보충하는 방법을 순수 Ni Pellet를 사용하는 점이 다르다. Ni Pellet의 사용은 전주과정에서 산화가 용이하고 음극표면에서 상대적인 금속이온 감소가 심하며, Sludge와 Ni Pellet의 상호반응으로 Ni Pellet의 전기화학적 이온화현상과 기체가 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Ni Pellet의 입출구에 필터를 배치하였다.

Table 4-6 Process Parameter and Solution of Electroforming.

Solution & Process Parameter		Content
NiSO ₄ or Ni(SO ₃ NH ₂) ₂ (g/ℓ)		300~450
H ₃ BO ₃ (g/ℓ)		30~45
Temp		25~90
NiCO ₃		Ni Cation
Pulse Current Density (mA/cm ²)	NiSO ₄	50~150
	Ni(SO ₃ NH ₂) ₂	100~300
Duty Cycle(%)		10~60
Frequency(Hz)		10~1000

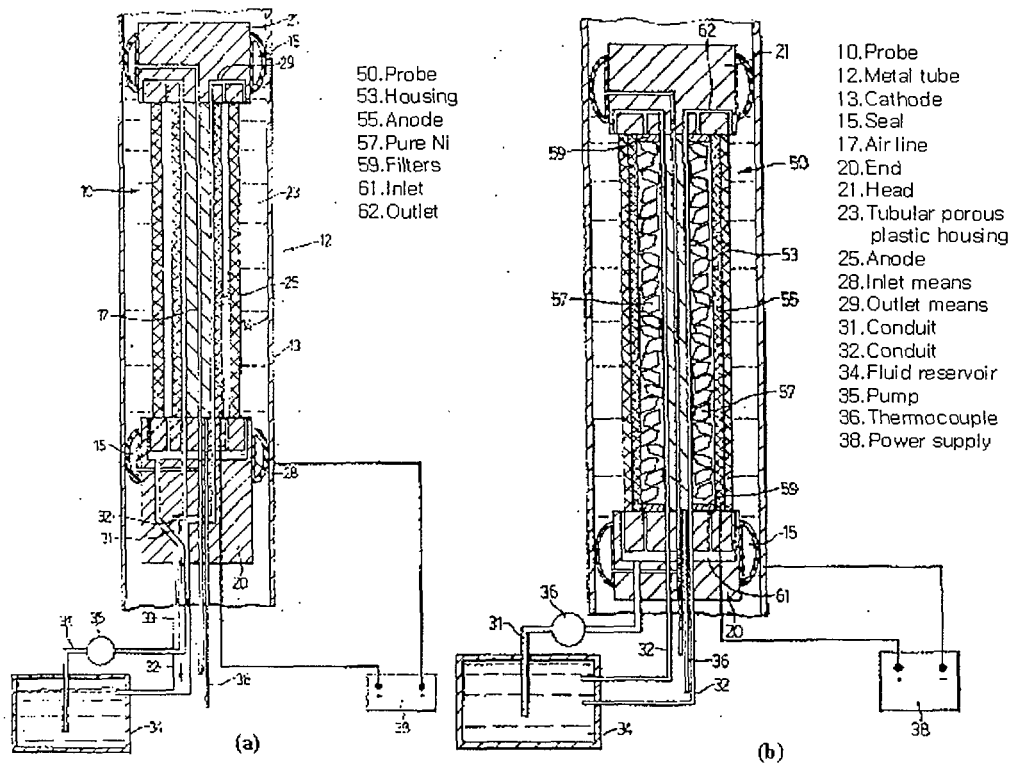


Fig.4-24 Electroforming Probe developed by Ontario Hydro Technology.

제 3 절 현장 경험

열화된 전열관을 보수하는 방법은 플러깅과 슬리빙의 방법이 있으며, 이를 통한 보수가 플러깅 한계를 넘거나 전열관 효율의 급격한 감소시에 증기발생기를 교체한다. 플러깅은 전열관을 가동영역에서 제외시키는 방법이며, 슬리빙은 열화된 부분을 보수하여 재사용하는 방법이다. 여기서는 Doel 4와 Kewaunee의 발전소의 보수 경험을 알아보려고 한다.

1. Doel 4 발전소

Doel 4 발전소는 1991년 관관 상부에서 열화현상을 경험하였다. 전열관을 가동영역에서 제거하여 Lap. 실험을 수행한 결과, 소량의 전열관에서 2차측 원주방향균열을 확인하였다. 1993년 열화된 전열관의 증가에 따라 웨스팅하우스 HEJ법으로 1738개의 슬리브를 설치하였다. 그 다음해에 1차측에서 2차측으로 누설현상이 발생하여 Technical Specification 한계에 도달하였으며, Hydrostatic 실험결과, 몇몇 슬리브에서 누설 현상이 발견되었다. 또한 비파괴검사에서 결함이 발견되지 않은 소수의 전열관을 가동영역에서 제거하여 검사하였다. 검사결과, 상부 조인트 Hydraulic Expansion에 의한 모재의 확관 영역에서 1차측 원주방향 균열이 검출되었으며, 이러한 균열은 슬리브 설치과정에서 고인장잔류응력, 고온 작업, PWSCC에 민감한 모재 등이 원인인 것으로 밝혀졌다. 기존에 설치된 슬리브를 보수하기 위해 조인트 상부에 Hydraulic Expansion으로 확관한 다음 레이저 용접을 실시하였으며, 후열처리를 통해 잔류응력을 제거하였다. 이와 같은 시설치 슬리브의 재보수 방법은 Doel 4 발전소에 설치한 슬리브의 확관부가 슬리브의 끝에서 6inch 하단에 설치하였기 때문에 가능하였다. 1994년 가동정지기간동안 11232개의 웨스팅하우스형 레이저 용접 슬리브가 설치되었다.

1995년 6월, 레이저 용접으로 재보수한 HEJ 슬리브와 레이저 용접 슬리브중 6개의 HEJ 슬리브와 4개의 레이저 용접 슬리브를 Lap. 검사를 위하여 제거하였다. 실험결과, 용접부의 상단영역에서 모재의 Bulging과 Outwar Expansion이 발견되었으며, 용접결함인 고온균열, 기공 등도 발견되었다. 또한 본래의 HEJ 조인트와 재보수한 레이저 용접부 사이의 Crevice 영역에서 전열관(I600 LTMA)과 슬리브 (I690)의 Wastage가 발견되었다.

2.Kewaunee 발전소

Wisconsin Public Service Corporation은 1980년대 중반, Kewaunee 발전소에서 2차측 결함을 발견하였다. 수백개의 전열관이 플러킹되었고, 1988년과 1991년 사이에 4328개의 웨팅하우스 HEJ 슬리브가 설치되었다. 1994년 정지기간 중 77개의 전열관에서 결함이 검출되었다. 검출된 결함의 대다수는 상부 조인트의 Hardroll Transition 하부에서 발견되었고, 원주방향 결함인 것으로 판명되었다. 1995년 정기검사시 전열관 700여개에서 결함이 발견되었으며, 결함들의 대부분이 1994년 검출된 결함 특성과 유사한 것으로 밝혀졌다. 1996년과 1997년 정기검사서 전열관 1350여개에서 결함이 검출되었다. Lap. 검사결과, 재보수가 요구되었다. 첫 번째 재보수방법으로 Hardroll 조인트 중앙에 레이저 용접을 실시하는 방법이 제안되었으나 성공률이 매우 적은 것으로 확인되었다. 650여개의 슬리브가 이 방법의 레이저 용접으로 재보수되었으나, UT 검사결과에 의하면 겨우 198개 슬리브만이 재사용이 가능한 것으로 분석되었다. 용접결함은 2단계에 걸쳐 발생하는데, 첫단계는 Hardroll에 의한 형상학적 특성에 기인하여 용접과정에서 발생한 고온 가스의 유출이 불가능하여 내벽에 다수의 기공을 형성하였다. 두 번째 단계로 이렇게 형성된 기공은 다음 용접 Pass에서 고온균열을 유도하는 것으로 판명되었다. 두 번째 재보수 방법으로 HEJ 상부에 용접 공간을 확보한 후 레이저 용접을 실시하였다. 1250번의 용접이 실시되었으며, ECT 및 UT 검사에 의해 80%의 성공률을 보인 것으로 확인되었다.

제 5 장 결 론

슬리브 재료로 1983년까지는 Inconel 600 MA 및 TT가 주로 사용되었으나 요즘에는 PWSCC 저항성이 우수한 Inconel 690 TT와 Incoloy 800이 주로 사용된다. 그러나, Incoloy 800은 미국 NRC의 허가를 받지 못하고 있는 상태에 있다.

슬리브 길이에 제한을 주는 인자는 관판 하부에서 수실상부까지의 거리로 가장자리는 이 길이가 12inch에 불과하며, 위치적으로 보수장치의 접근이 어려운 부분이다. 슬리브 길이는 레이저 용접 슬리빙은 150mm, FTI사의 Electrosleeving 보수 기술은 200mm이하로 축소가 가능하며, ABB CE 및 Westinghouse사의 Direct Tube Repair 보수 기술은 최소 26mm 까지도 가능하다. 슬리브 벽두께는 전열관 벽두께보다 약간 작은 것이 좋으며, Radial Clearance는 원하는 보수 위치에 도달하는데 방해받지 않을 0.30~0.46mm가 적당하며 작을수록 좋다. 확관 방법에 따라 SCC 발생율은 Mechanical-Roll이 가장 높았으며, Hydraulic Expansion이 가장 낮았다.

슬리브를 설치하기 위해서는 설치방법에 따른 조인트 강도 및 Leak Tightness, PWSCC에 대한 저항성, 설치 공정 변수 범위에 대한 평가, 장치와 절차가 보수 계획 및 방사선 피폭에 미치는 영향, 용가재 사용시 앞에서 언급한 조건을 만족하는지에 대한 검토가 선행되어야 한다. 슬리브의 실제응용과 모의시험은 많은 차이가 있으므로 이를 극복하기 위해서는 첫째, 운전조건에 대한 정확한 이해가 필요하며, 둘째, 자격검증시험에서 실제 적용상황에서 야기될 수 있는 모든 상황에 대한 시험이 선행되어야 하며, 셋째, 소량 슬리브의 현장 설치율 통해 예기치 못한 문제점들을 발견하여야 한다.

증기발생기 전열관 보수기술을 보유하고 있는 용역업체로는 외국의 ABB CE, FTI, Westinghouse, MHI(Mishibish Heavy Industry) 등이 있으며, 국내의 한국중공업이 있다.

ABB CE사는 14기 이상의 발전소에 14000개 이상의 슬리브를 설치하였다. 보유하고 있는 보수기술은 주로 TIG Welding을 이용하여 기밀을 유지하며, 관판부에 Straight Tubesheet Sleeve, 가장자리에 위치한 전열관에 Peripheral Tubesheet Sleeve, 관지지판에 Tube Support Sleeve, 관판 및 관지지판에 PLUS Sleeve의 방법을 사용하고 있으며, 최근에 Nd:YAG 레이저를 이용한 Direct Tube Repair 기술을 개발하였다.

FTI는 21기 이상의 발전소에 10000개 이상의 슬리브를 설치하였다. 재순환형

증기발생기의 관판 및 관지지판에 Brazed Sleeve가 사용되며, 일체형 증기발생기의 상하부 관판, 관지지판, Upper Span에 Hydraulic, Rolled, Mini Sleeve가 사용된다. 최근에 개발된 Electrosleeving 기술은 슬리브를 삽입하는 기존 보수 방식의 단점인 가공유기응력과 열응력에 의한 잔류응력형성으로 SCC 발생 가능성과, 냉각수 유속 감소 및 열전달 효율 감소를 최소화할 수 있다.

Westinghouse사는 17기 이상의 발전소에 59000개 이상의 슬리브를 설치하였다. 슬리브 기술로는 PWSCC 민감성이 낮은 전열관에 적용되는 HEJ와 PWSCC 민감성이 높은 전열관에 적용되는 Laser Welded Sleeve의 2 가지가 있다. 과거에는 Brazed Sleeve가 사용되기도 하였으나 지금은 사용되지 않고 있으며, ABB사와 마찬가지로 최근에 Laser를 이용하여 Tube Direct Repair 기술을 개발하였다.

이와 같은 여러 종류의 슬리빙은 크게 관을 삽입하는 Intrusive Sleeve와 관을 삽입하지 않는 Non-intrusive Sleeve로 분류할 수 있다. Intrusive Sleeve는 관을 삽입함으로써 상하부 조인트를 제작하기 때문에, 이 때 형성된 잔류인장응력에 의하여 슬리브 설치 후결함이 발생한다. 또한 입열과 가공에 의해 미세조직의 변화 및 형상학적 불균일성이 초래되며, 이것은 후열처리를 통하여서도 제거하기가 매우 어렵다. 그러나 Non-intrusive Sleeve의 Electrosleeving은 이와 같은 조인트 제작이 불필요하며, 우수한 보수 성공율을 나타내기 때문에 차세대 보수법으로 대두되고 있다.

제 6 장 참고문헌

- 1) F. W. Cooper, "In-Place Retubing and Sleeving of Nuclear Steam Generator", Paper presented at American Nuclear Society Meeting, Detroit, Michigan, June 1983.
- 2) Electric Power Research Institute, Workshop Proceedings, "Replacement and Repair of Steam Generator", Report No. EPRI NP-3207-SR, August 1983.
- 3) J. E. Gutzwiller, "Expanding Service Life of Steam Generators by Sleeving Tubes". Paper presented to American Power Conference, Chicago, Illinois, April 1982.
- 4) Steam Generator Reference Book (Rev 0), EPRI Steam Generator Owners Group.
- 5) L. Stieding, B. Stellwag, N. Wielding and R. Rieß, Kerntechnik, Vol.55, No.6, p.340, 1990.
- 6) M. G. Fontana, "Corrosion Engineering", McGraw Hill, 2nd Edition, p. 51.
- 7) E. E. Chick, et al. NDE and Mechanical Removal of Sludge in PWR Steam Generator Vol. 1; Overview and Utility Experience. EPRI Report NP-5563 Vol. 1, January 1988.
- 8) Description of Bechtel/KWU welded sleeves, submitted to Dominion Engineering, Inc. by letters dated March 7, 1989 and October 4, 1989.
- 9) Description of Combustion Engineering welded sleeves, submitted to Dominion Engineering, Inc. by letters dated March 7, 1989 and October 4, 1989.
- 10) J. A. Gorman, Guidelines for Procurement of Alloy 690 Steam Generator Tubing, Draft report prepared for EPRI December 1988.
- 11) J. A. Gorman and E. S. Hunt, Status and Suggested Course of Action for Nodenting-Related Primary Side IGSCC of Westinghouse-Type Steam Generators, EPRI Report NP-4594-LD, May 1986.
- 12) C. M. Owens, EPRI Report NP-5498, p.14.
- 13) KAERI Report, Study on Thermal & Mechanical Properties of U-tube Materials for Steam Generator, KAERI/RR-1190/92, 1992.
- 14) Westinghouse Electric Corporation, Indian Point Unit 3 Steam Generator Sleeving Report, Report WCAP-10146 prepared for the Power Authority of the State of New York, September 1982.
- 15) United States Nuclear Regulatory Commission, Safety Evaluation, Ginna Nuclear Power Plant, Docket No. 50-244, undated, about July 1983.
- 16) Combustion Engineering, Inc. Palisades Steam Generator Tube Repair

Sleeving, Report No. CEN-42 (P), August 26, 1977.

17) J. Stubbe and C. Leblois, "Belgian Utilities Experience with Nickel Electroplating and Sleeving." Paper presented at EPRI Workshop on PWSCC Remedial Measures, Clearwater Beach, Florida; February 8-10, 1989.

18) Strain Damage Model for Alloy 600 in Primary Water, EPRI Report No. NP-7008, October 1990.

19) B. Michaut, "PWSCC Prevention and Repair", Paper presented at EPRI Workshop on PWSCC Remedial Measures, Clearwater Beach, Florida, February 1989.

20) R. E. Gold et al, "Rotopeening Model E Steam Generator Tubing at Doel 4 and Tihange 3", SGOG/EPRI Workshop; Management of Steam Generators Susceptible to Primary Side Cracking; Remedial Actions and NDE Methods, St. Petersburg, Florida; December 1985.

21) B. P. Miglin and G. J. Theus, "Stress Corrosion Cracking of Alloy 600 and 690 in All-Volatile-Treated Water at Elevated Temperature" Workshop Proceeding; U-Bend Tube Cracking in Steam Generators, Palo Alto, Calif; EPRI Report NP-5761 SP, June 1981.

22) J. A. Gorman and A. McIlree, Report regard following Setember 1987 trip to Sweden and France, Nombor 17, 1987.

23) F. W. Pement, G. E. Economy and R. J. Jacko, Tube Sheet Expansion Improvements, EPRI Reports NP-5547, December 1987.

24) J. A. Begley, "Predicting Times to Cracking for PWSCC", February 8-10, 1989 EPRI Clearwater Beach Florida Workshop on PWSCC Remedial Measures.

25) "SG Welded Sleeve - Upper Joint Investigation at Laborelec", Outline dated 02.08.89 presented to EPRI by J. Stubbe.

26) S. W. Glass, "Ultrasonic and Eddy Current Examination of Sleeved Tubing", EPRI Workshop on PWSCC Remedial Measures, Clearwater Beach, Florida, February 8-10, 1989.

27) D. Degrave and D. Dobbeni, "UT Development for the Inspection of Electroplated and Sleeved Tubes", Paper presented at EPRI Workshop on PWSCC Remedial Measures, Clearwater Beach, Florida, February 8-10, 1989.

28) PWR Steam Generator Examination Guidelines, Revision 5, EPRI TR-107569-V1R5, September 1997.

29) Hermann O, LaGally, Larry M Kozak, Semur P. Sathi, US Patent No. 5789720, 1998.

- 30) Susanta Sinha, Philip S. Brown, Douglas G. Harman, Harold T. Keller, David F. Olechovsky, Wenche W. Cheng, US Patent No. 4649492, 1987.
- 31) Wenche W. Cheng, US Patent No.4620662, 1986.
- 32) Wenche W. Cheng, US Patent No. 4650110, 1987.
- 33) Shane J.Findlan, Wylie J. Childs, US Patent No. 5430270, 1995.
- 34) Jeffrey L. Snow, Josef A. Lauer, Predrag Mastilovic, US Patent No. 5983487, 1999.
- 35) H. T. Yum, J. S. Lee, Plating and Surface Modification, Munwundang, p.252-257, 2000.
- 36) D. Osmola, P. Nolan, U. Erb, G. Palumbo and K. T. Aust, Phys. Stat. Sol. (a) 131, 569, 1992.
- 37) K. Boylan, D. Ostrander, U. Erb, G. Palumbo and K. T. Aust. Scripta Metall. et Mater., 25, 271, 1991.
- 38) Framatome Technologies Inc., Electrosleeving Qualification for PWR Recirculating Steam Generator Tube Repair, March 1996.
- 39) G. Palumbo, E. M. Lehockey, P. Lin, U. Erb and K. T. Aust, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 458, 273, 1997.
- 40) G. Palumbo, P. J. King, K. T. Aust, U. Erb and P. C. Lichtenberger, Scripta Metall. et Mater., 25, 1775, 1991.
- 41) C. Cheung, U. Erb and G. Palumbo, Mater. Sci. Eng., A185, 39, 1994.
- 42) Framatome, US Patent No. 4624750, 1986.
- 43) Nicholas M. Martyak, US Patent No. 6099624, 2000,
- 44) JP Patent No. JP97241883, 1997.
- 45) Nicholas, US Patent No. 6099624, 2000.

서지정보양식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/AR-590/2001					
제목/부제	증기발생기 전열관 보수기술				
연구책임자 및 부서명	김승호(한국원자력연구소 로봇개발실)				
연구자 및 부서명	정현규, 정승호, 김창희, 정용무, 서용철, 김정수, 서무홍				
출판지	대전	발행기관	KAERI	발행년	2001
페이지	p.83	도표	있음(v),없음	크기	26cm
참고사항					
비밀여부	공개(v), 대외비(), _급 비밀	보고서 종류	연구보고서		
연구수행기관	원자력연구소	계약번호	53561-00		
<p>초록</p> <p>슬리브를 설치하기 위해서는 설치방법에 따른 조인트 강도 및 Leak Tightness, PWSCC에 대한 저항성, 설치 공정 변수 범위에 대한 평가, 장치와 절차가 보수 계획 및 방사선 피폭에 미치는 영향, 용가재 사용시 앞에서 언급한 조건을 만족하는지에 대한 검토가 필수적이다.</p> <p>ABB CE사가 보유하고 있는 Welded Sleeve 기술 3종류와 PLUS Sleeve 기술, FTI사가 보유하고 있는 재순환형 증기발생기에 적용 가능한 Brazed, Kinetic Sleeve 기술과 일체형 증기발생기에 적용 가능한 Hydraulic, Roller Sleeve 기술, 그리고 전기주조(Electroforming)를 이용한 Electrosleeving 기술, Westinghouse사가 보유하고 있는 HEJ, Laser Welded Sleeve 기술의 설치방법 및 특성에 대하여 검토하였다. 열화된 전열관을 보수하기 위해 슬리브를 설치하게 되며, 이 때 인가되는 가공유기응력 및 열응력에 의하여 차후 결함이 발생할 가능성이 있음을 확인하였다. 따라서 잔류응력을 최소화하는 것이 매우 중요하며, 이에 대한 차세대 보수 방안으로 전기도금을 이용하여 슬리브를 삽입하지 않는 Electrosleeving기술이 FTI사에 의해 개발되어 실용화 단계에 있다.</p>					
주제명키워드	증기발생기, 전열관 보수기술, 슬리빙, 일렉트로슬리빙, 레이저 용접, TIG 용접, 브레이징, 확관, 잔류응력, 응력부식균열				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/AR-590/2001					
Title / Subtitle	Repair Technology for Steam Generator Tubes				
Project Manger and Department	Seung-Ho Kim				
Researcher and Department	Hyun-Kyu Jung, Seung-Ho Jung, Chang-Hoi Kim, Young-Moo Jung, Yong-Chil Seo, Jung-Su Kim, Moo-Hong Seo				
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	2001
Page	p.83	Ill. & Tab.	Yes(0), No()	Size	cm.
Note					
Classified	Open(0), Restricted() — Class Document		Report Type	Technical State of the Art Report	
Sponsoring Org.			Contract No.	53561-00	
Abstract(15-20Lines)					
<p>The most commonly used sleeving materials are thermally treated Alloy 600 and thermally treated Alloy 690 Alloy. Currently, thermally treated Alloy 690 and Alloy 800 are being offered although Alloy 800 has not been licensed in the US.</p> <p>To install sleeve, joint strength, leak tightness, PWSCC resistance, evaluation on process parameter range and the effect of equipments and procedures on repair plan and radiation damage have to be investigated before sleeving.</p> <p>ABB CE provides three type of leak tight Alloy 690 TIG welded and PLUSS sleeve. Currently, Direct Tube Repair technique using Nd:YAG laser has been developed by ABB CE and Westinghouse. FTI has brazed and kinetic sleeve designs for recirculating steam generator and hydraulic and rolled sleeve designs for one-through steam generators. Westinghouse provides HEJ, brazed and laser welded sleeve design.</p> <p>When sleeve is installed in order to repair the damaged S/G tubes, it is certain that defects can be occurred due to the plastic induced stress and thermal stress. Therefore it is important to minimize the residual stress. FTI provides the electrosleeve technique as a future repair candidate using electroplating.</p>					
Subject Keyword (About 10 Words)	Steam Generator, Steam Generator Tubes, Sleeving, Electrosleeving, Laser Welding, TIG Welding, Brazing, Expansion, Residual Tensile Stress, SCC				