

---

## 원자력 증기발생기 결함 세관 보수용 폭발 sleeving에 관한 연구

A Study on the Explosive Sleeving of A Repair for Defective Tube/Tubeplate on the Nuclear Steam Generator

이병일\* . 강정윤\*\* . 이상래\*\*  
B.I.Lee\* . J.Y.Kang\*\* . S.L.Lee\*\*

---

**Key Words** : Explosive Sleeving(폭발 Sleeving), PETN(펜트리트 화약), Groove(홈), sheath (완충재), Sleeve Assy (화약조립), Pull-out Load(인발하중), Hydraulic Leakage(내수압), Stand-off Distance(유효간격) Stress Corrosion Cracking(응력부식파괴)

### Abstract

Unfortunately leaks occur in heat exchangers periodically, usually at the tube to tubeplate joint. The usual method of repair is to plug off the defective area and isolate the tubes of concern from the circuit. If the leaks continue, the thermal capacity of the units is progressively reduced and for this reason the alternative of using an internal bridging sleeve has been examined. This paper discusses the overall development activities that has been found necessary to bring this repair procedure to a successful conclusion for use on the nuclear steam generator.

In this work we have investigated optimum explosives and explosive quality, explosive sleeving's thickness, the design of sheath, stress relieving heat treatment, pull-out load, hydraulic leakage, stress corrosion cracking properties.

The results obtain are as follows :

- (1) The optimum explosives and explosive qualities are PETN and about 15~40 gr/ft of explosive sleeving in nuclear steam generator.
- (2) Explosive sleeving's thickness is 1.1~1.4mm, If groove of 0.35mm formed in sleeve outside existed, For the hydraulic leakage is go up, explosive sleeving of formed groove are applicate tube and turnplate.
- (3) If the stress relieving heat treatment are experiment in 750°C, 850°C, 15 minutes Pull-out strength of sleeving 1,500~2,300kg, hydraulic leakage is 250kg/cm<sup>2</sup>,

\* 우리 학회 회원, 韓國重工業 容接技術研究所 主任, \*\* 教授, \*\*\* 教授

## 1. 서론

원자력 증기발생기는 튜브시트 형태 및 튜브의 재질에 따라 각각의 튜브의 치수와 진원도에 있어서 차이가 있으나, 오랜 기간 사용하게 되면 경수와 같은 유체 등의 편마모에 의한 튜브 내부 타원화 경향, 마모, 튜브 외면의 두께 감소와 같은 여러 가지 원인으로 인한 응력 부식 Crack 등으로 튜브의 기계적 강도가 약화되거나 두께가 얇아져서 파손되는 경우가 자주 발생한다고 알려져 있다.<sup>1~3)</sup> 원자력 증기발생기용 튜브는 보통 3,000~9,000 여개의 U자 형의 튜브로 구성되어 있으며, INCONEL 혹은 ONCONOY 재질로서, 수명이 30년 이상 사용할 수 있도록 설계 및 제작되었지만, 평균적으로 5년 이상 장시간 사용함으로써 인해 부식, 유체 마모, 진동, 열충격 등으로 튜브의 일부가 파손되며, 주요 파손 부위는 튜브시트 직상부의 손상으로부터 시작된다고 할 수 있다. Fig. 1에는 원자력 증기발생기의 튜브시트 주요 손상 부위의 개략도를 나타낸 것이다.

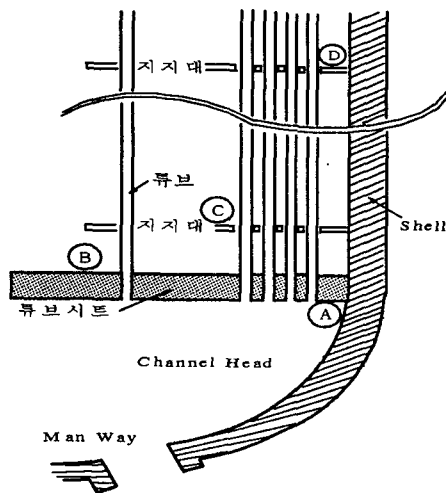


Fig.1 Damage positions of tubes nuclear steam generator

원자력 증기발생기의 운전 중 튜브의 결함이 가장 많이 발생하는 지점은 Fig. 1의 튜브시트 상부의 B 지점으로서 결함튜브의 약 50~70% 범위의 손상이 나타나는 지점이다. 이와 같이 튜브의 파손이 일어나는 주요한 원인은 주로 터빈 블레이드의 유체와의 마찰에 의한 마모, 튜브 내면의 유속에 의한 마모 등에서 발생된  $Fe_3O_4$  슬러지에 의한 부식 결함이 주요 원인이다. 그 다음으로 많이 파손되는 주요 부위는 그림 C, D 지점의 튜브지지대 (Support Plate) 튜브의 파손으로 주로 경수(經水)의 빠른 유속에 의한 튜브 외면의 마모 또는 진동이 그 원인이 되어 발생한다. 가장 많이 파손될 수 있는 부위는 튜브시트 직상의 튜브가 집단으로 구성되어 있는 B 부위와 튜브 지지대의 튜브 집단 C 와 D 부위이다. 그러나 튜브의 파손이 Shell에 가까이 발생한다면 즉, A의 부근에서 발생한다면 Sleeve 길이가 600mm 이상이므로 보수가 불가능하고, 지지대 상부에서 파손이 일어나고, 이미 C 또는 B 부위에 Sleaving된 부분이 있으면 Sleaving 작업이 불가능하게 되므로 Plugging을 하여야 한다. 대체로 전체 파손 범위의 Sleaving 최대 가능 범위는 80% 정도이며 약 20% 정도는 Plugging하는 경우가 대부분이다.

그러나 Dickinson 등에 의하면 Plugging 비율이 전체 튜브수의 10%를 넘으면 나머지 튜브에 부하가 증가되므로 증기발생기 전체에 대한 교체가 불가피해진다고 할 수 있다.<sup>5~6)</sup>

지금까지 Sleaving 방법에 대해서는 많이 알려져 있지만, Sleaving 전에 ECT나 UT 검사 후 결함이 있는 튜브는 Wire Brush나 먼 Brush 등으로 전처리를 하여야 하며, Sleeve를 삽입한 후 Sleeve의 양 끝단부를 확관하여야 한다. 주로 소개되어 있는 확관 방법은 대체로 수압, 롤 또는 폭발확관법이 사용되고 있으며 Sleeve의 끝단 접합은 주로 TIG 용접이나 브레이징 방법이 적용

되고 있다. 최근에는 레이저를 열원으로 하여 정밀하게 용접하려는 경향이 지배적이다.<sup>7~9)</sup>

Sleeving 전에 Sleeve 외면과 파손 Tube 내면의 접합강도를 높이기 위하여 파손된 튜브 내면을 깨끗이 청소하여야 하는데 보통 롤 또는 수압 확관의 경우에는 Stainless Brush, Steel brush, Cotton Brush, 세정 건조 등의 순서로 행한다. 그리고, 유속에 의한 튜브 내면의 편 마모가 있는 경우에는 Drilling 공정이 추가되어야 한다. 하지만 폭발 확관의 경우에는 Stainless 또는 Steel Brush 정도로도 충분한데, 그 이유는 폭발 확관시 튜브내면의 이물질이 폭발압에 의해 순간적으로 제거되며, 폭발 접합 후에도 밀착도가 매우 양호하기 때문이다.

그리고 Sleeve의 확관은 Fig. 2와 같이 파손된 튜브의 파손 부위를 중심으로 Sleeve를 삽입하고 Sleeve의 양 끝단의 접합부분을 롤, 수압, 폭발 등의 방법으로 확관 하여야만 다음 공정인 Sleeving 접합이 가능해진다. 수압 확관의 경우는 격납용기 내로 유압 장비를 분해하여 인력으로 운반하여 분할, 조립하여 설치해야 함으로서 방사선 피폭량이 상대적으로 증가한다. 또한 롤 및 수압 확관의 경우에는 원격제어 Manipulator System이 복잡해지는 결점이 있다. 확관된 Sleeve의 상, 하부는 ABB-CE사의 경우에는 Fig. 2와 같이 브레이징 또는 TIG 정밀 용접 방법으로 접합한다.<sup>10)</sup> 어떤 방법이든 열원이나 압력의 정밀 조절이 필수적인데 열원의 공급 방법은 저항선 전열 가열, 고주파 가열, TIG의 저항 Arc 가열, 레이저 가열 등이 있다. 그런데 열원의 공급 제어는 전기 가열인 경우 전류 등의 자동 제어 장치로서 조정되는 반면, 레이저는 전류, 렌즈, 반사체 및 펄스 등으로 정밀 조정 기능이 매우 우수하다. 폭발 용접인 경우는 폭발압력의 조정 기능으로서, 확관과 용접이 동시에 가능하지만, 파손 튜브의 상, 하 부위가 건전하거나, 튜

브시트 내의 튜브 파손인 경우에만 적용되므로 Sleeving 범위가 제한된다. Fig. 3은 Westinghouse Type의 대표적인 Sleeving 공정 부분도로서 폭발확관 또는 수압 확관후 레이저를 이용하여 정밀용접을 수행한다.

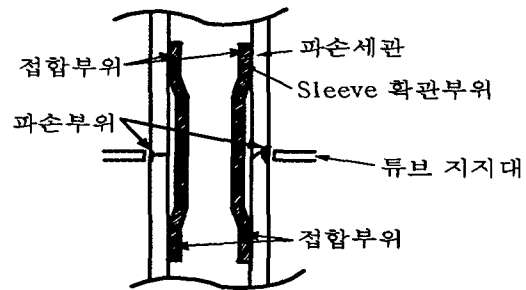


Fig.2 Sleeve expansion & joining

## 2. 실험방법

### 2. 1 폭발 Sleeving Mock-Up Test

고리 1호기 및 영광 3호기의 원자력 증기 발생기 튜브와 동일한 재질과 치수의 실험용 튜브를 준비한 뒤 실험용 튜브 즉 세관은 최악의 상태를 가상하여 마모나 부식의 경우에는 직경 5mm를, Crack이 존재하는 경우에는 튜브를 절단한다.

Sleeve는 INCONEL 690 재질로서 두께는 1.2mm, 외경은 각각 18.98mm 및 15.95mm로 하고 홈 즉 Groove의 깊이는 0.35mm짜리 3개를 형성하고 펜트리트 PETN 화약사용하여 폭발 확관하여 Sleeve 외경과 구형 Tube 내면을 접합시킨 후, 내수압시험, 인발시험 및 조직시험 등을 실시한다

또한 본 연구의 가장 기초가 되는 화약은 폭발 접합 간의 시간차가 없기 때문에 균일한 접합

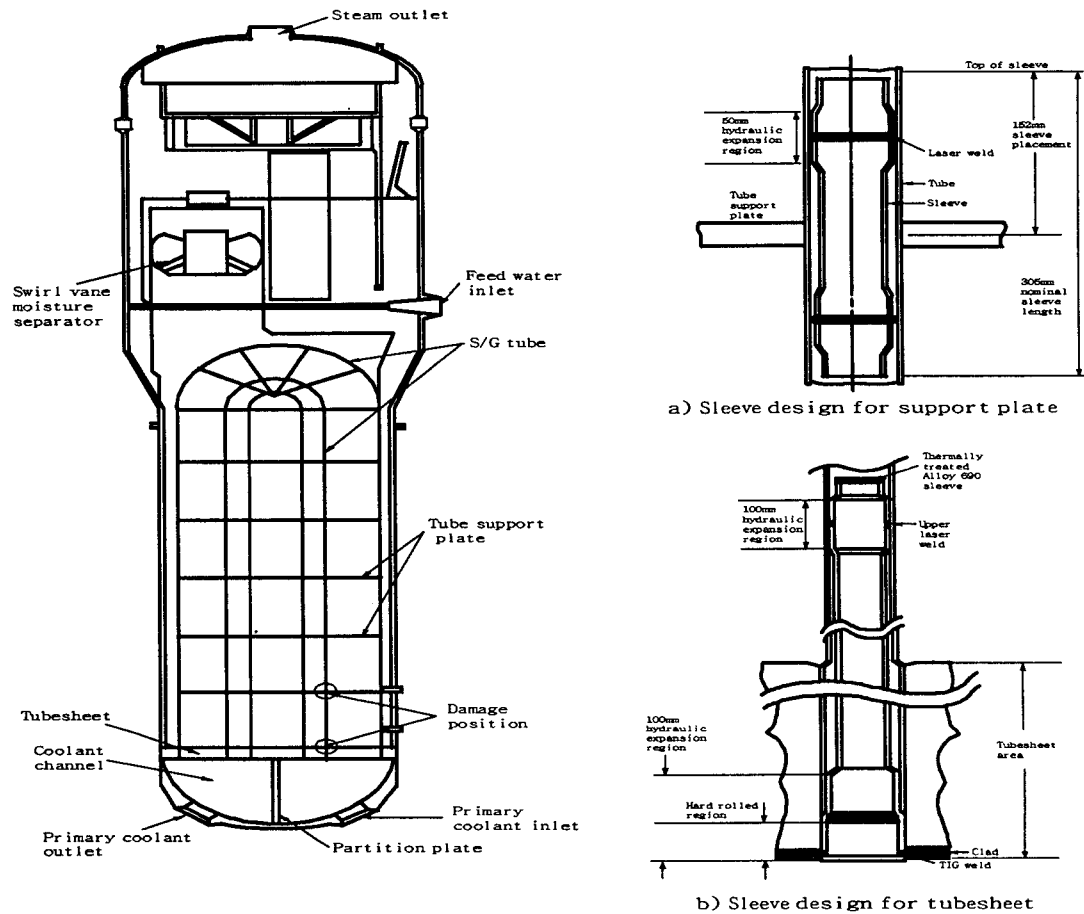
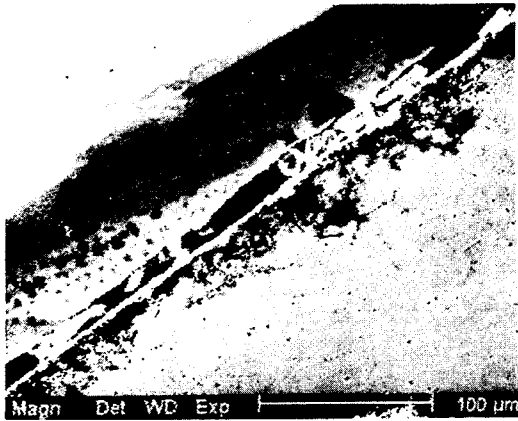


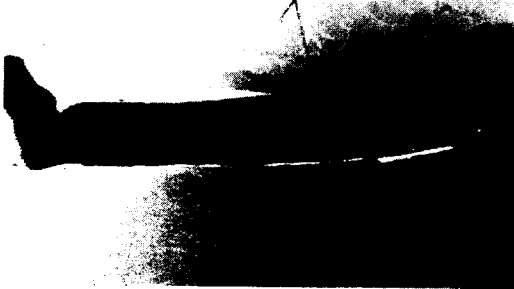
Fig. 3 Methods of Sleeving in Westinghouse Type

실험 항목	실험 내용	비고
1. 내수압시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Leakage pressure : 260kg/cm<sup>2</sup></li> <li>● Sleeve End Cap Welding : t 1.5mm 이상 Weld 2.0mm 이상</li> </ul>	
2. 인발시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pull Out Load : 750kg 이상 이거나 Sleeve 항복강도 50% 이상</li> <li>● Pull Out Speed : 1mm / 1min</li> </ul>	
3. 조직시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Clearance Gap 측정 : 50 μm 이하</li> <li>● 폭발확관 Sleeve의 Micro Structure 변화</li> <li>● Sleeve의 Micro hardness 측정</li> </ul>	

Table 1 The Test item of Explosive Sleeving in nucle steam generator



(a)



(b)



(c)

Photo. 1 Microstructure of Inconel 690 tubes in nuclear steam generator

(a) No groove part

(b), (c) Groove part

성을 가질 수 있는 펜트리트(PETN) 화약을 사용하였으며, 화약량은 약 1.5~8.5g/m의 범위로 하였다. 사용된 PETN 화약은 비중이 1.59g/cc, 화약의 폭발속도가 약 8,400m/sec로서 매우 빠르기 때문에 많은 튜브를 연결하여 1회에 작업하여도 튜브의 폭발접합 간의 시간차가 없기 때문에 화약의 품질의 균일성이 유지될 수 있도록 하였다.

화약의 폭발력을 제어하여 일정한 압력으로 튜브에 전달하는 매개체로서 사용된 완충재(Sheath)는 화약 폭발시 화약이 튜브표면에 직접 접촉하는 것을 방지하여 화약잔류물이 튜브 표면에 부착되지 않도록 하고, 튜브의 손상을 방지하며, 폭발력을 균일하게 분산시키는 역할을 한다. 따라서 본 연구에 사용된 완충재는 이러한 조건을 만족시키기 위해서 200%의 탄성율을 가지는 고연성, 저밀도 폴리에틸렌(Poly-Ethylene)으로 제작하였으며, 확관 길이를 정확하게 하여 화약과 완충재의 조립 및 장입을 편리하도록 하였다. 또한 폭발시험은 안전성과 소음 제거를 위한 음파 간섭홀, 경화고무로 구성되어 있으며, 내부와 외부사이에 톱밥으로 채워져 있는 특수하게 제작된 폭발시험장에서 하였다.

화약의 기폭을 위해 사용되는 뇌관은 한국공업규격(KS) 4807에서 규정된 6호 공업용 뇌관을 사용하였는데 6호 공업용 뇌관은 길이 35mm, 직경 6.5mm 로 외곽은 알루미늄으로 되어 있고, 전폭약 0.45g 및 점폭약 0.40g을 함유하고 있다. PETN를 기폭시키기 위한 도화선은 연소 시간이 1m당 120~130초의 적정 시간이 유지될 수 있는 것을 사용하였다.

그리고 본 연구에 사용된 Sleeve의 외경, 두께 및 항복강도는 폭발 확산 변수에 큰 영향을 미치는 값이므로 치수 검사를 정밀하게 실시하였으며, Sleeve의 치수에 따라서 분류한 후 각각의 물리적 성질을 조사하였다. Table. 1은 본 연구에 사용된 Sleeve의 사양에 대한 것으로서 Sleaving 실험을 위한 튜브의 평균 인장강도는 34 ksi, 평균 항복강도는 48 ksi 평균 연신율은 55% 이었다.

그리고 Mock-Up 시험용 튜브시트는 SA 508 CL. 3의 저합금강(Low Alloy Steel)으로 주조, 단조, 열처리한 후 1차면은 두께 5~8mm로 Inconel Cladding하였다. 이 Mock-Up용 Block은 튜브시트 두께 553mm, 460~825mm로 면 가공한 후 직경 19.25mm로 Drilling 한 것을 사용하였다. Sleaving용 완충제와 완충제 캡은 ASTM D-1248을 만족하는 재질로 제작하였으며, 완충제와 캡은 불순물이 없는 연성 폴리에틸렌 재료이며, 치수는 Sleeve의 내경보다 0.1~0.5mm 작게 제작하여 사용하였다. 또한 Sleeve Assy.의 화약조립은 Mock-Up 실험용 Plug 내경보다 0.1~0.5mm 작게 가공된 연성 폴리에틸렌 완충제의 5mm 내경에 PETN 등의 화약을 조립하여 Sleeve 장착후 Mock-Up 실험하였다. 실험용 증기발생기 모형은 폭발 Sleaving 기술의 실제 적

용을 위하여 Mock-up 실험용 증기발생기의 Channel Head 부위를 설계하여 제작한 것을 사용하였다. 폭발 Sleaving된 Sleeve와 튜브 사이의 내수압 강도를 측정하기 위하여, Sleeve용 수압시험편을 Fig.4 와 같이 제작하여 사용하였다. 실험 방법은 50, 100, 200, 250, 300kg/cm<sup>2</sup>에서 각각 10분간씩 유지해 누수 여부를 검사한 후 단계별로 압력을 증가시켰다.

튜브시트 홀 또는 튜브와 폭발 접합된 Sleeve의 인발하중(Pull-out Load)을 측정하기 위하여, 100 Ton 인장시험기에 Fig. 5와 같이 장착하여 실험하였다.

수압시험후 모재와 Sleeve 접합계면의 Clearance Gap을 정밀 분석하기 위하여 광학현미경(OM) 및 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였고, 위치별 주요성분은 EPMA를 이용하여 분석하였다. 폭발 Sleaving 후의 Sleeve 및 튜브의 미소 정도 변화를 조사하기 위하여 미소경도기를 사용하였으며 하중은 500g, 하중유지시간은 30초로 하였다. 이와 같은 정도 측정을 통하여 사용중에 발생하는 Sleeve의 응력부식 파괴 정도를 어느 정도 예측 할 수 있다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3. 1 화약량에 따른 내수압 변동률

Fig. 6과 Fig.7 은 6 종류의 Sleeve에 대해서 PETN 화약량의 증가에 따른 내수압의 변화를 측정한 결과이다. 화약량이 증가함에 따라 Leak 발생에 대한 내수압 허용 압력은 상대적으로 증가한다. 하지만 Sleeve와 Tube 사이에 존재하는 공기는 화약 폭발시 폭발속도가 8,400m/sec일 정도로 고속이므로 공기가 미처 빠져나갈 여유가 없다

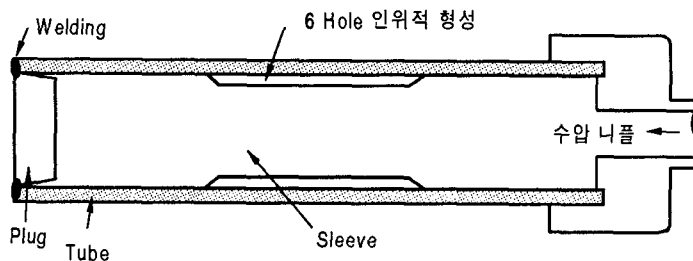


Fig. 4 Sleaving specimen for the hydraulic leakage test

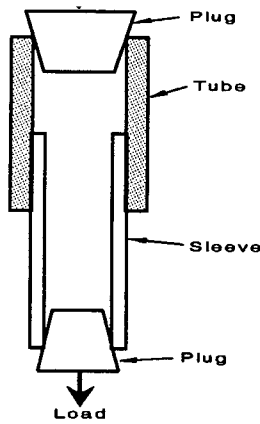


Fig.5 Pull-out test of explosive sleeve

고 가정할 때, 압축된 공기의 압력은 약 15~20kg/mm<sup>2</sup> 정도 되므로 실제로 튜브의 항복강도는 그만큼 높게 된다고 할 수 있다. 그리고 튜브 외면과 튜브시트 홀 사이에 존재하는 이물질의 형상, 크기, 성분 등은 튜브와 튜브시트의 계면 분석에서 상세히 설명하고자 한다.

적 용 대 상	모의 실험 파손 위치	Sleeve Mock-up	사용화약량 (gr/ft)	내수압 (kg/cm <sup>2</sup> )
영광 #3	· 튜브시트 상부 · 지지대 튜브 마모 · 지지대 부위 파손	· 튜브 인위적 Crack 발생	PETN 31, 40	225, 230
		· 5 Drilling Hole	31, 40	220, 240
		· Sleeve 절단	31, 40	0, 0
고리 #1	· 튜브시트 상부 · 지지대 튜브 마모 · 지지대 부위 파손	· 튜브 인위적 Crack 발생	PETN 31, 40	160, 170
		· 5 Drilling Hole	31, 40	0, 0
		· Sleeve 절단	31, 40	0, 0

Table. 2 The results of leak tightness on the explosive sleeve position

### 3. 2 Sleeve 형태에 따른 내수압 변동율

Table. 2는 6 종류의 Sleeve에 대하여 내수압을 측정된 결과로서 화약량이 증가함에 따라 내수압은 상대적으로 증가하였고, PETN 40gr/ft에서 지지대의 마모 부분까지 가능함을 알 수 있다.

그러나 고리 1호기의 경우에는 직경이 크거나 인위적 Crack이 발생된 경우를 고려하여 튜브를 절단하고 Sleeve에 Groove를 형성하여 화약량을 40gr/ft까지 증가하더라도 폭발 Sleeve는 약간의

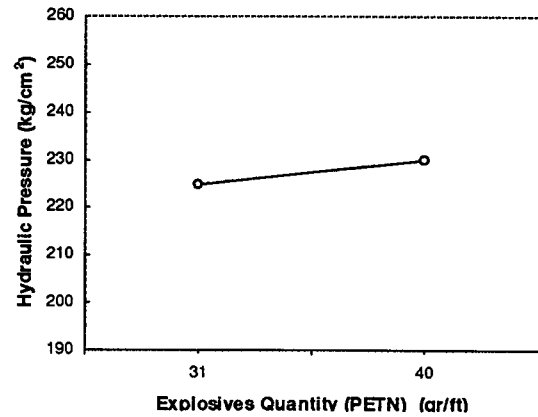


Fig. 6 Results of hydraulic pressure test for Yonggwang's sleeve mock-up test

수압에서도 Leak가 됨으로서 정밀 용접 및 열처리의 필요성이 있다고 사료된다.

### 3. 3 Sleeve 형태별 인발 하중

Fig. 8은 Sleeve 형태별로 인발하중을 측정된 결과인데, 모든 형태의 Sleeve 시편에서 최소 1,800kg 이상의 인발하중 값을 얻을 수 있었다.

특히 영광 3호기의 Sleeve의 경우는 3,500kg 이상의 인발하중 값을 나타내었다

### 3.4 Sleeving 계면의 미소경도 변화

Fig. 10은 폭발 Sleeving후 Fig. 9에서 나타난 지점에서 측정된 미소경도 변화를 나타낸 것이다. Fig.10에서 알 수 있듯이 원래의 튜브에 비해 Sleeve 튜브의 경도값이 상대적으로 높게 변화는 위치에 관계없이 거의 균일하게 나타났

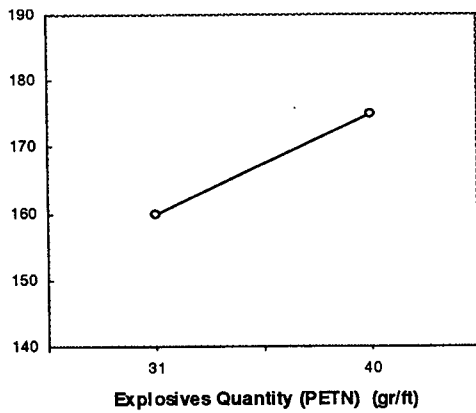


Fig.7 Result of Hydraulic pressure test for Gori's sleeve mock-up test

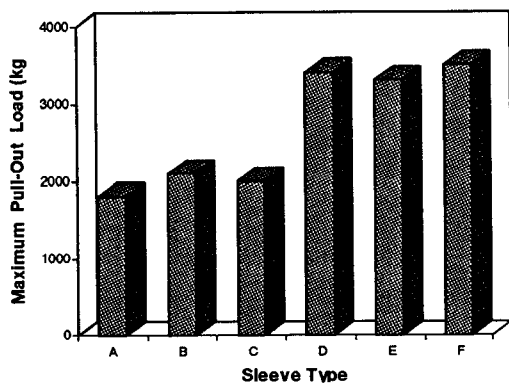


Fig. 8 Relation of the between explosive sleeve and full out loads (A,B,C : Gori's type. D,E,F : Yonggwang's Type)

으나, Sleeve 튜브의 길이방향 미소 경도 변화는 Groove의 Edge 부분에서 불균일하게 나타나고, 특히 이 Groove의 Edge 부분에서 전체적으로 높게 나타났다. 이는 Sleeve 튜브의 Groove 가공시 Edge 부분에서 상대적으로 보다 심한 충격에 의한 응력 집중으로 경도가 높아진 것으로 사료된다.

따라서 이상의 결과로 추측하건대 Sleeve 튜브와 원 튜브의 밀착도를 높이기 위해 Sleeve 튜브에 도입한 Groove가 Sleaving후 경도상승에 의

한 응력 집중 부위로 작용할 수 있으므로 Sleaving 후 열처리 등에 의한 Groove Edge 부분의 가공경화를 해소시켜 줄 수 있는 공정이 필요할 것으로 사료된다.

### 3.5 Tube/Sleeve 확관 계면 분석

#### 3.5.1 Tube/Sleeve 계면의 Clearance Gap

Photo. 1은 폭발 Sleaving 후 Tube/Sleeve 계면을 관찰한 미세 조직사진이다. 사진에서 볼 수 있는 바와 같이 전체적으로 계면사이의

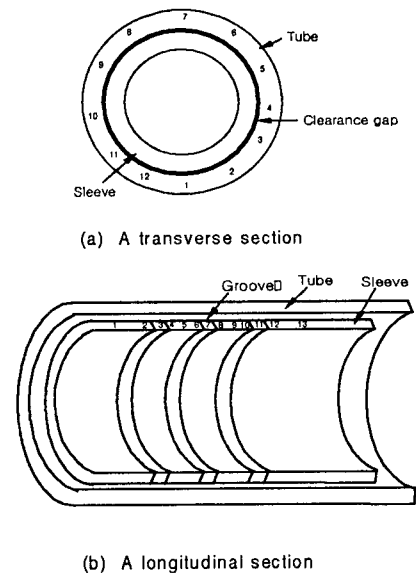
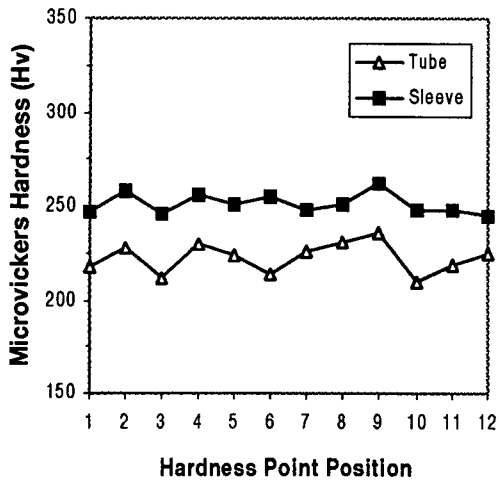


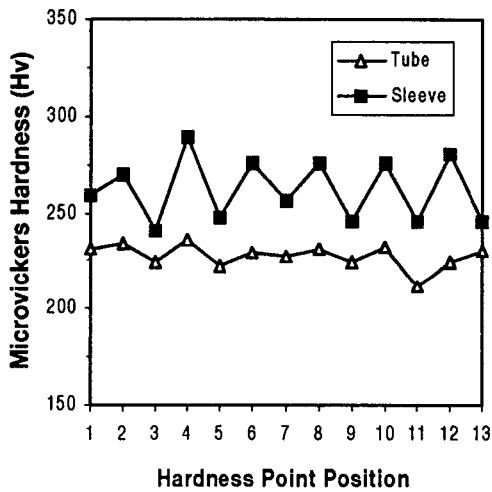
Fig. 9 Positions of microstructure test

Clearance Gap은 20~40mm 정도로, 이와 같은 Gap이 생기는 원인은 폭발시 계면에 잔존하던 공기와 불순물의 영향 때문인 것으로 추측되는데, 폭발 Sleaving시 밀착도를 좋게 하기 위해서는 폭발시 계면 공기의 영향은 폭발속도가 빠르 계면에 있는 불순물을 보다 철저히 제거할 필요가 있다. 한편, 사진 (a)에서 볼 수 있는 것처럼 Groove가 없는 평평한 부분에서의 Clearance Gap이 사진(b), (c)의 Groove 부분에서의





(a)



(b)

Fig.5-7 Microhardness values of tube/sleeve  
(a) A transverse section  
(b) A longitudinal section

Fig.10 Microstructure hardness values of Tube/sleeve

기 때문에 피하기 어려우므로 폭발 Sleaving 전 Clearance Gap보다 좀더 작운데, 이는 초기 유

효간격인 Stand-off Distance의 영향 때문인 것으로 여겨지나 그 차이는 크지 않다고 사료된다.

※ 위 사진 참조.

Photo.1 Microstructure of tube/sleeve interface  
(a) No groove part (b). (c) Groove Part

### 3.5.2 계면 불순물의 분석

Fig.11은 Sleeve 튜브 Matrix Photo. 1의 (a) 와 Tube/Sleeve 계면 사이의 불순물 Photo. 1의 (b), (c) 에 대한 EPMA 결과를 나타낸 그림이다. 전체적으로 앞의 Photo. 1의 (a)의 Tube/Sleeve 계면에서 많이 관찰되는 불순물들은 그림 (b)에서와 같이 Si의 Peak만이 검출되는 것으로 보아, 폭발 Sleaving 때 주변의 먼지 등이 유입되어 계면에 존재하는 것으로 보인다. 따라서 이러한 불순물들이 유입되지 않게 하는 것이 계면 사이의 밀착도를 높이는 한 방법이라고 사료된다.

한편 Fig. 11의 (c)는 Sleeve에 가공한 Groove에 존재하는 불순물에 대한 것으로서, EPMA의 결과 Fig. 11의 (a)의 Sleeve Matrix의 EPMA 결과와 유사하다는 것을 알 수 있다. 따라서 이 불순물은 Groove 가공시 생긴 외면의 약한 부분이 폭발시 충격에 의해 떨어져 나온 것으로 추정된다.

※ 위 사진 참조

Fig.11 The results of EPMA for tube/sleeve interface  
(a)Sleeve matrix(b)General impurity of interface (Photo. 1의 (a)) (c) Impurity of groove part(Photo.1의(b))

## 4. 결론

- (1) 원자력 증기발생기의 폭발 Sleaving용으로 적절한 화약은 PETN이었고, 적절한 화약량은 약 15~40 gr/ft 범위로서 주변 Ligament

- 에 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다.
- (2) 폭발 Sleeve의 두께는 1.1~1.4mm가 가장 적당하며 Sleeve 외면에 깊이 0.35mm의 Groove를 형성하면 동일한 화약량에서도 운전가능 내수압이 상승되므로 Sleeve 설계시 Groove를 형성하는 Sleeve는 튜브시트 상부의 결합이 있는 튜브의 세관에 적용할 수 있다.
  - (4) Sleeve와 화약 사이에서 폭발힘의 분산, 전달, 제동 역할 및 폭발 후의 잔유물을 흡수하는 완충제 즉 Sheath는 저밀도 폴리에틸렌 재질로서 설계, 제작하는 것이 효과적 이었다.
  - (5) 증기발생기 튜브시트 또는 튜브시트 직상 90 mm 까지는 홈을 가진 Sleeve로 폭발 확관한 후 750℃, 850℃, 15분 동안 응력제거 열처리하면, Sleeving의 인발강도는 1,500~2,300kg 범위로서, 내수압 250kg/cm<sup>2</sup> 이상으로서 만족한다. 응력제거 열처리 실험을 한 결과 폭발 Sleeve의 내수압은 증가하였는데 이것은 폭발시의 잔류 응력이 해소되면서 Sleeve와 Tube가 밀착되는 현상 일 것으로 사료된다.
  - (6) Sleeve 외면의 Brazing 재질로서 경납을 사용하면 내수압이 상승하는 것을 알 수 있다.
  - (7) 폭발 접합체 계면의 미세 조직 관찰 결과 10~60mm 크기의 산화물이 폭발 Sleeve와 튜브사이에 존재함으로써 누수를 방지하였다.
  - (8) 원자력 증기발생기의 튜브 결합 상태가 유체 마모, 응력부식, Crack 등으로 인하여 튜브가 약화된 상태 즉 최초 항복강도의 50% 이하, 15kg/mm<sup>2</sup>이면 폭발 Sleeving 만으로 만족할 만한 내수압을 보증할 수 없다. 따라서 폭발 결합 세관에 정밀 폭발 Sleeving 한 후 Laser 등으로 정밀 용접 한 후 열처리하여야 할 것으로 사료된다.
- and reheater replacement and evaporator repair, Atom 331, (1984), pp.11-14
  - (2) G. Brierley, O. Hayden : Replacement superheaters and reheaters for the prototype fast reactor, Liquid metal engineering and technology, BNES, LONDON, (1984), pp. 241-247
  - (3) F. S. Dickinson, A.F.Taylor, P.W.Jackson, R.W.Smith : A repair technique for defective tube/tubeplate welds in the downreay prototype fast reactor evaporators, pp.269-279
  - (4) G. E. Sheward, M, Baron : An in situ repair method for a sodium steam heat exchanger, AWS philadelphia, April (1983).
  - (5) F. S. Dickinson, A. F. Tayler, P. W. Jackson, R. W. Smith : Sleeving operation extends nuclear plant service life-part 1, Welding and metal fabrication, July/August (1984), pp.229-233
  - (6) F. S. Dickinson, A. F. Tayler, P. W. Jackson, R. W. Smith : Sleeving operation extends nuclear plant service life, Welding and metal fabrication, October, (1984) pp.304-305
  - (7) L. E. Stark, E. L. Brown, W.R. Johnson : Remote Maintenance of nuclear steam generators, pp.275-282
  - (8) W. R. Johnson : Explosive welding plugs in heat exchanger tubes, welding Journal, Vol. 50, No.1, (1971), pp23
  - (9) G.E.Sheward, M.baron : An in-place repair method for a sodium-steam heat exchanger, Welding Journal, (1983), pp.39-47
  - (10) F. C. Old : Sleeving saves nuclear steam generator tubes, Power engineering, December, (1981)

## 5. 참고문헌

- (1) G. Brierley, P.W. Jackson : Per superheate