

---

## 폭발접합된 원자력 증기발생기 튜브/튜브시트 계면 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of the interface in Tube / Tubesheet of  
the Nuclear Steam Generator by Explosive Bonding

이병일\* . 공창식\* . 심상한\* . 강정윤\*\* . 이상래\*\* .  
B.I.Lee\* . C.S.Kong\* . S.H.Shim\* . J.Y.Kang\*\* . S.L.Lee\*\*.

---

**Key Words:** Explosive Bonding(폭발접합), RDX(화약), Detonation Cord(도폭선), sheath  
(완충재), Expansion Ratio(확관율), leakage Tightness(수압강도), Stress  
Corrosion Cracking (응력부식파괴), Residual Stress(잔류응력) Free  
Expansion Rate(자유확관율)

### Abstract

This study deals with interface characteristics of tube and tubesheet of the nuclear steam generator by the explosive expansion in order to take advantage of optimum expansion ratio , pull-out strength and leakage tightness and improvement of the resistance on the stress corrosion cracking for low residual stress. The paper also show the relationship between roll, hydraulic and explosive expansion.

The results obtain are as follows :

- (1) Because of the explosive bonding is to use the high speed pressure and energy by the explosive, workability is good, bonding region is homogenous .
- (2) Expansion ratio is 2.7%, Pull-out strength 850kg, Leakage strength 500kg/cm<sup>2</sup>. Clearance gap is 10~30mm in case of explosive expansion and interface structure of the tube and tubesheet is optimum condition.
- (3) As the transition region of the explosive expansion is inactive, the resistance of the stress corrosion cracking is increases 30~40% compare to the roll and hydraulic expansion.

---

\* 공 창식 ; 주임연구원, \*\* 심 상한 : 선임연구원

## 1. 서론

화약의 순간 폭발력을 이용한 폭발접합기술은 1900년 말경 화약을 사용하기 시작하면서 부터 이용되어 왔던 기술이며, 체계화 되기 시작한 것은 세계1차 대전 말에 폭탄의 파편이 주변의 다른 금속 제품에 충돌되면서 접합되는 현상을 발견한 시점 부터 였다고 할 수 있다.<sup>1~2)</sup>

폭발접합기술은 1944년 Carl에 의해 최초로 학계에 보고된 이후 Philipchuk과 Bois 등에 의해 현상학적이고, 이론적인 규명을 하기 시작하였다. 폭발접합은 폭발로 발생하는 순간 초고압을 이용하여 튜브를 확관시키는 방법으로서, 이것은 폭발용접에서 요구하는 폭발속도와 다르며, 튜브와 튜브시트의 계면 사이에 야금학적인 접합은 일어나지 않고 Pressurized Type의 Fitting 이라고 할 수 있다. 또한 롤확관 에서 얻을 수 있는 Fitting과 비교하여 좀 더 조밀하며 경제적인 Process로 알려져 있다.<sup>3~4)</sup>

확관에 따른 접합강도는 Joint Leak Tightness는 튜브의 확관에 의해 생긴 영구 소성 변형과 튜브시트 내에 탄성변형의 회복에 의해 생긴 잔류 압축 Hoop Stress의 크기에 좌우되므로 접합강도를 증가시키기 위해서는 튜브시트 내의 압축 Hoop Stress가 튜브 보다 커야 할 것이다. 즉 튜브시트의 항복강도가 크면 튜브의 영구 소성 변형이 일어나는 동안 튜브시트의 탄성회복의 정도가 높아져 밀착도가 향상될 것이다.<sup>5~7)</sup> 그러므로 폭발 접합시 적정 화약량은 튜브의 소성변형 정도가 탄성 회복량 보다 큰 지점에서 튜브시트 홀의 확관(변형)을 막을 수 있는 최대 화약량의 범위내에서 조정되어야 하며, 이러한 폭발확관은 확관 길이를 튜브시트의 두께에 따라 화약길이를 조절함으로써 쉽게 늘릴 수 있다는 점과 튜브시트 두께 전 범위에 걸쳐 확관될 때 접합체의 표면적이 클수록 접합체의 강도와 접합성이 향상된다는 것이 장점이다.<sup>8~10)</sup>

또한 롤확관은 튜브내경에 가까울수록 원주방향으로 튜브 Grain Structure Re-orientation이 일어나며, 그 결과 높은 가공경화 현상이 일어난다. 그러나 폭발 확관에서는 이러한 현상이 일어나지 않으므로 SCC가 발생할 확률이 적어진다. 또한 Fig.1에 나타낸 바와 같이 폭발확관의 경우가 롤확관에 비해 잔류응력이 훨씬 낮기 때문에 Crack 발생확률은 훨씬 적다고 할 수 있다. 그리고 내수압 및 인발강도를 높이기 위하여 Sleeve 외면 또는 튜브시트 홀내에 홈을 형성하면 폭발확관의 경우에는 좋은 결과를 얻을 수 있다고 보고되고 있다.<sup>13)</sup> 롤확관기는 홀내로 튜브를 축 변형시켜 부분적으로 압출된 형상이 됨으로써 튜브 안쪽에서 홈 부분의 확관 접합된 모양을 볼 수 없지만, 폭발확관의 경우에는 화약의 충격 파로 인해 분명하게 관찰할 수 있으므로 롤확관의 경우 보다도 높은 수압 및 인발 강도를 얻을 수 있다.<sup>14~18)</sup>

Fig. 1는 롤확관, 폭발확관 및 수압확관시 튜브에 도입된 잔류응력과 부식성 분위기에서의 균열발생 가능성에 대한 상관관계를 보여주는 비교 곡선이다. 그림에서 볼 수 있듯이 폭발확관과 수압확관의 경우가 롤확관에 비해 확관시 도입되는 잔류응력의 정도가 상당히 낮으며, 이에 따라 최초 균열이 발생하는데 걸리는 시간도 길어짐을 알 수 있다.<sup>18~19)</sup> 이는 폭발확관과 수압확관이 확관시 튜브시트 전범위에 걸쳐 균일한 확관 압력이 작용하며, 확관시 튜브내면과 접촉하는 부하하중이 상대적으로 응력집중이 덜 걸리는 변형 접촉 방식이므로 롤확관에 비해 잔류응력이 덜 걸리며, 균열발생 시간도 길어진다.

먼저, 튜브내면에서의 잔류응력과 균열발생 시간을 살펴보면 폭발확관의 경우가 롤확관에 비해 잔류응력이 매우 낮은 것으로 나타나는데 이는 롤확관의 경우는 확관작업시 롤확관기의 물리가 튜브내면과 접촉하면서 튜브 확관이 일어나므로

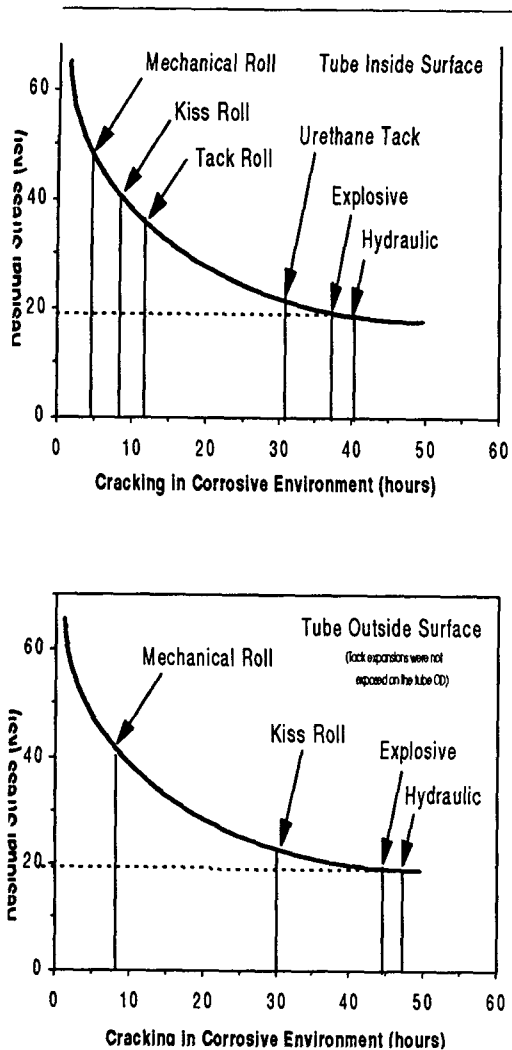


Fig.1 Residual stress vs time to crack curves of the expansion process

튜브와 롤러 사이의 선형접촉에 따른 불균일한 확관압력에 의한 응력집중과 특히 튜브시트 전범위에서 한번에 확관을 할 수 없는 롤확관의 한계성 때문에 확관시 작업이 여러 단계를 거쳐야 하므로 전범위에서 균일한 확관 압력이 작용하기 힘들기 때문에 사료된다. 반면에 폭발확관은 확관시 튜브시트 전범위에서 균일한 확관 압력이 작용하며, 변형 접촉 방식으로 부가하중

이 튜브내면에 가해지기 때문이라고 생각할 수 있다. 한편 수압확관의 경우에는 폭발확관에 비해 잔류응력이 상대적으로 적게 걸리는 것으로 나타나는데, 이는 수압확관이 전범위에서 동일한 압력이 작용하고 확관시 튜브내면 과부하중이 접촉하는 측면에서는 폭발확관과 동일하나 상대적으로 폭발확관에 비해 정적하중이 작용하기 때문에 사료된다. 그러나 그림에서 볼 수 있듯이 폭발확관과 수압확관의 잔류응력값의 차는 별로 크지 않다.

두번째 튜브외면을 살펴보면 전체적으로 잔류응력이나 균열발생 시간 등에 대한 확관방법에 따른 상대적인 경향은 튜브내면에서의 유사하나 튜브내면과 달리 직접 부가하중과 접촉하는 면이 아니므로 전반적으로 도입된 잔류응력이 튜브내면에 비해 낮으며, 특히 롤확관의 경우 튜브내면에 비해 낮아짐을 알 수 있다.

이상에서 알아보았듯이 폭발확관은 화약의 폭발력을 이용함으로써, 짧은 시간에 작업공정을 완성할 수 있는 장점과 확관후 튜브에 상대적으로 적은 잔류응력이 존재함으로써 잔류응력에 의한 SCC의 발생을 억제할 수 있는 이점이 있는 확관 방법이라 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 화약을 사용한 폭발접합에 대한 원리 및 응용에 대하여 기술하고, 폭발접합된 원자력 증기발생기 튜브와 튜브시트 계면의 특성을 조사하여 기존의 롤확관 및 수압확관과 비교하여 접합부의 특성을 평가하고자 한다.

## 2. 실험방법

원자력 증기발생기는 대부분 튜브시트와 튜브간의 상호작용이나 접합부의 접합성 여부 그리고 열교환에 의한 응축과 증발에 따른 재료의 열화와 해수에 의한 응력부식파괴가 큰 문제가 되고 있으며, 특히 튜브와 튜브시트간의 접합성 여부가 증기발생기의 수명을 좌우한다고 할 수 있다.

항 목	Grade A (Low Y.S)	Grade B (High Y.S)	Grade C (Middle Y.S)
1.항복강도(kg/mm <sup>2</sup> )	24.6	34.6	28.1
2.인장강도(kg/mm <sup>2</sup> )	63.0	62.8	62.0
3.연신율(%)	49.0	46.0	48.0
4. 치수	O.D 19.05mm×1.07mm Wall		
5. 재질	SB 163-Alloy 600(UNS N 06600) Seamless Mill Annesled Tubes		
6. 화학성분	C:0.024,Mn:0.23, Si:0.185: <0.001,Ti:0.33 CO:0.02,P:0.005,Cu:0.01,Cr:15.22,Ni:75.62 Fe:8.19		
7.GrainSize (ASME)	5.5		
8.가공및 열처리 온도	Cold Working 1.090 °C		

Table 1. Chemical compositions of Tube and Tube-sheet on the nuclear steam generator

본 연구에 사용된 원자력 증기발생기 튜브와 튜브시트의 사양은 Table 1에서와 같이 Mn 1.25, Cr 0.22 가 함유된 Mild Steel 튜브시트와 Cr 15.22, Ni 75.62의 SB163 Alloy 600 Seamless Mill annealed Tube를 사용하였으며, 튜브의 외경이 19.05mm(3/4")와 15.88mm(5/8")의 두종류의 튜브를 사용하여 폭발확관 실험을 하였다.

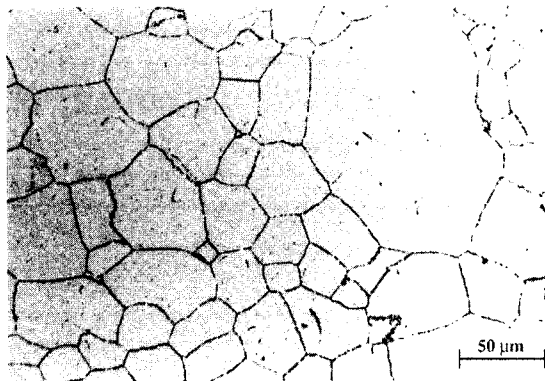


Photo. 1 Microstructure of Inconel 600 tubes in nuclear steam generator

강도가 24.6~28.1kg/mm<sup>2</sup>, 인장강도가 약 63kg/mm<sup>2</sup>, 연신율이 약 47%인 것을 사용하였다.

또한 본 연구의 가장 기초가 되는 화약은 폭발 그리고 Photo. 1은 본 연구에 사용된 Alloy 600 튜브의 전형적인 ferrite 조직을 나타내고 있으며, 냉간 가공한 후 1,090°C에서 열처리한 것으로서 항복 접합간의 시간차가 없기 때문에 균일한 접합성을 가질 수 있는 RDX(Hexogen, CH<sub>2</sub>NNO<sub>2</sub>)<sub>3</sub> 화약을 사용하였으며, 화약량은 약 1.5~ 8.5 g/m의 범위로 하였다. 사용된 RDX 화약은 비중이 1.59g/cc, 화약의 폭발속도가 약 8,400m/sec로서 매우 빠르기 때문에 많은 튜브를 연결하여 1회에 작업하여도 튜브의 폭발접합간의 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 화약간류물이 튜브표면에 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.

폭발접합에 대한 작업 공정을 Fig. 2에 나타내고 있으며, 화약을 가로 세로로 배열하여 한번의 폭발에 의해 약 50~200홀 까지 접합이 되도록 하였다. 또한 화약의 길이는 접합하고자 하는 길이보다 약간 작게 함으로서 튜브시트 뒷면의 확관에 따른 튜브의 응력 발생으로 파손이 일어나는 것을 방지하였다. 화약을 기폭 시키기 위한

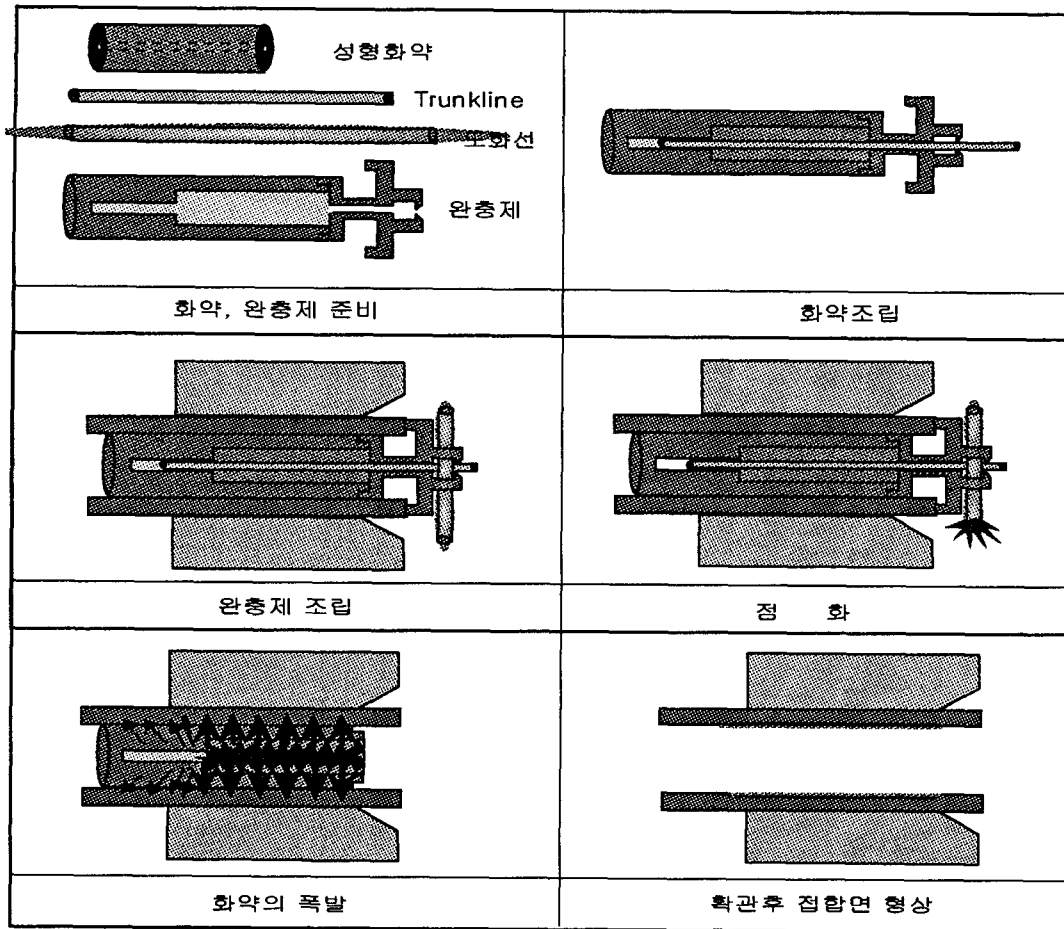


Fig.2 Explosive Expansion Procedure

Trunkline의 연결은 기존에는 화약의 끝단에 Trunkline를 연결함으로써 불발률이 높았으나, 본 연구에서는 완충재의 형상을 달리하여 화약과 Trunkline을 직접 연결하여 불발이 없도록 하였다. 또한 폭발확관을 위한 최초 점화의 경우, 기존에는 작업기구보다 상당히 먼 거리인 바닥에서 점화를 함으로서 뇌관의 폭발 파편에 대한 위험성을 내재하고 있었으나, 본 연구에서는 작업기구에 부착할 수 있는 장치를 개발하여 작업성과 안전성을 향상시켰다. 폭발접합 후 완충재

(Sheath) 제거는 압축가스를 이용하여 제거하였고, 완충재의 잔재를 확인 할 수 있는 보조품을 개발하여 튜브 내부에 완충재 잔류 유무를 정확히 확인 할 수 있도록 하였다.

폭발 시험은 안전성과 소음 제거를 위한 음파 간섭홀, 경화고무로 구성되어 있으며, 내부와 외부 사이에 톱밥으로 채워져 있는 특수하게 제작된 폭발시험장에서 하였다.

화약의 기폭을 위해 사용되는 뇌관은 한국공업규격(KS) 4807에서 규정된 6호 공업용 뇌관을

사용하였다. 6호 공업용 뇌관은 길이 35mm, 직경 6.5mm으로 외관은 알루미늄으로 되어 있고, 전폭약 0.45g 및 점폭약 0.40g을 함유하고 있다. RDX를 기폭시키기 위한 도화선은 연소 시간이 1m당 120~130초의 적정 시간이 유지될 수 있는 것을 사용하였다.

그리고, 튜브시트 내에서 튜브의 확관 실험을 하기 전에 튜브의 자유 팽창율(Free Expansion Rate)도 조사하였으며, 이때 사용된 튜브는 Inconel 600 및 SUS 304로써 크기는 5/8" (t=1.5494mm), 3/4" (t=0.889mm)이다. 이때 실험에 사용된 화약은 RDX 화약으로서 1.5, 3.5, 5.5, 8.5g/m의 범위의 것을 사용하였다.

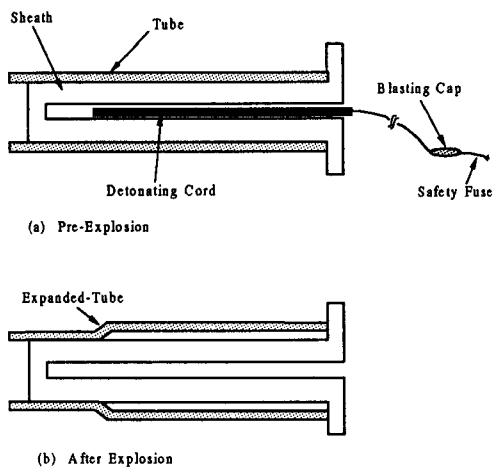


Fig. 3 Free Explosive expansion mock-up test

Fig. 3의 (a)와 같이 튜브시트 없이 튜브내에 조립된 화약과 완충재를 삽입하여 폭발 확관할 경우 Fig. 3의 (b)와 같이 화약량 변화에 따른 튜브의 자유확관율을 측정할 수 있다. 이때 적용되는 튜브 확관율의 산출은 폭발력이 작용할 때 튜브의 횡단면(Y축) 변화 뿐만 아니라 종단면(X

축)의 변화도 동시에 일어나므로 튜브직경의 변화로 확관율을 구할 경우 상당한 오차가 발생할 수 있으므로 튜브 두께 감소율로써 산출하고 있다. 여기서 확관율은 다음 공식으로 구할 수 있다.

$$\text{확관율(\%)} = \left( 1 - \frac{\text{확관후 튜브두께}}{\text{확관전 튜브두께}} \right) \times 100$$

$$\left( 1 - \frac{\text{확관후 튜브시트 홀 직경(C) - 확관후 튜브내경(D)}}{\text{확관전 튜브외경(A) - 확관전 튜브내경(B)} \times 2 \right) \times 100$$

폭발확관 실험은 Fig. 4와 같이 튜브시트 홀 내에 튜브를 장착하고 그 안에 화약조립체를 넣어 폭발확관 실험을 하였다.

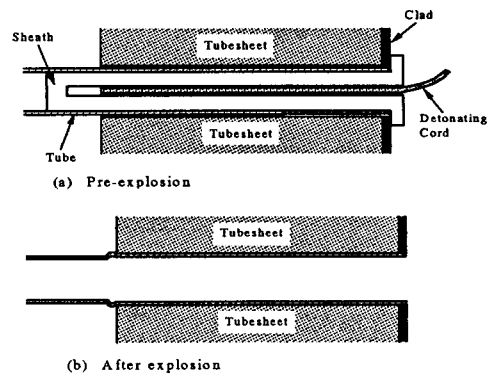


Fig. 4 Explosive expansion mock-up test

또한 물확관법으로 확관율 3~8% 범위로 확관율 실시하고 폭발확관과의 특성을 비교하였으며, 수압실험은 폭발확관과 물확관의 내수압 강도를 수압시험기에서 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600kg/cm<sup>2</sup>에서 각각 10분간 유지해 누수 여부를 검사한 후 단계별로 압력을 증가시켜 그 변화를 관찰하였다. 그리고 확관후의 인발강도 시험을 위해 시험용 지그를 제작하여 Mock-up Block과 조립하여 100 ton 인장시험기에서 그 값을 구

하였다. 폭발확관 및 롤확관 후의 튜브 및 튜브 시트의 경도변화를 미소경도시험기를 이용하여 하중 500g, 유지 시간은 30초로 측정 하였으며 튜브와 튜브시트 접합계면의 Clearance Gap을 측정 및 분석하기 위하여 광학현미경(OM) 및 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였고, 접합계면 내의 불순물은 EPMA(Electro Probe Micro Analysis)를 이용하여 분석하였다. 그리고, 튜브를 튜브시트 홀 내에 삽입한 후 튜브의 확관을 실시하면 확관 과정 중에 튜브 자체의 소성변형(기본적으로 튜브와 튜브시트 홀과의 유효간격만큼)이나 튜브시트의 구속에 의해 튜브에는 잔류응력이 발생되는데 확관후 튜브 및 튜브시트에 도입되는 잔류응력을 X-Ray를 이용하여 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 화약량 변화에 따른 튜브의 자유확관을

Fig. 5는 튜브 직경 3/4" ( $t=0.889\text{mm}$ )의 자유확관율을 측정된 결과이다. 화약량이 증가함에 따라 확관율은 증가하는 것으로 나타났으며, RDX 8.5g/m을 사용했을 때 즉 확관율이 20%의 범위를 벗어날때 튜브의 부분적인 파손이 발생함을 관찰할 수 있었다.

Fig. 6은 튜브의 직경 5/8" 2 종류( $t_1=0.889\text{mm}$ ,

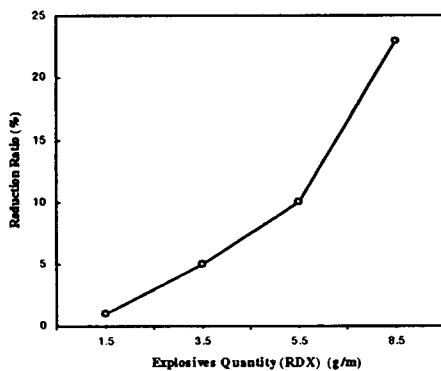


Fig. 5. The free expansion rates of 3/4" tubes of nuclear steam generator

$t_2=1.5494\text{mm}$ )의 자유확관율을 측정된 결과로서 Fig. 5의 3/4" 튜브와 같이 화약량이 증가함에 따라 확관율이 증가함을 알 수 있었다..

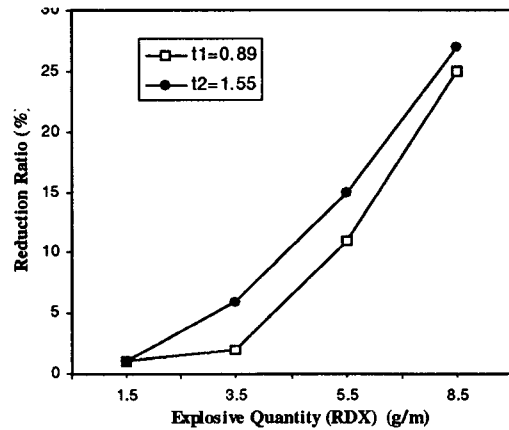


Fig. 6 The free expansion rates of 5/8" ( $t_1=0.889\text{mm}$ ,  $t_2=1.5494\text{mm}$ ) tubes of nuclear steam generator

Fig. 5와 Fig. 6의 결과를 비교해 보면, 튜브의 두께가 같은 경우 직경이 큰 3/4" 튜브가 직경이 작은 5/8" 튜브보다 확관율이 작으며, 두께가 조금 더 두꺼운 튜브와 확관율이 비슷한 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 튜브의 직경과 관련이 많은데, 같은 화약을 사용할 경우 튜브의 직경이 클 때는 튜브내에 삽입되는 완충재의 두께가 두꺼워져 폭발력에 따른 충격을 흡수하는 확율이 높아 상대적으로 확관에 기여하는 폭발 압력이 적어지기 때문이라고 할 수 있다. 이상의 화약량 변화에 따른 자유확관을 실험 결과로 보아 3/4" 및 5/8" 원자력증기발생기 튜브의 폭발확관에 사용될 수 있는 적정 화약은 RDX 3.5 g/m에서 5.5 g/m까지임을 알 수 있었다.

#### 3. 2 화약량에 따른 Mock-up 튜브의 확관을

Fig. 7에 3/4" 튜브 및 튜브시트 Mock-up에서

RDX 3.5, 5.5, 8.5 g/m의 3종류의 화약을 사용하였을 경우의 튜브확관을 변화를 나타내었다. 3.5 및 5.5g/m를 사용하였을 경우에는 확관을 크지 않으나 8.5 g/m를 사용하였을 경우에는 평균 7.5%의 확관을 얻을 수 있었다. 이러한 이유는 튜브와 튜브시트 사이에 존재하는 공기와 이물질이 확관을 방해하는 요소로 작용한다고 생각되며, RDX 8.5g/m은 폭발압력 즉 충돌압력이 3.5와 5.5g/m보다 2~3배 정도 높기 때문에 압축공기의 저항과 불순물의 압축저항을 이겨내고 튜브와 튜브시트 사이의 밀착도를 높일 수 있었으리라 사료된다.

튜브와 튜브시트 사이에 존재하는 공기는 화약의 폭발시 폭발속도가 8,400m/sec 정도로 매우 빠르므로 공기가 빠져나갈 여유가 거의 없다고 가정할 때 압축된 공기의 압력은 약 15~20kg/mm<sup>2</sup> 정도 되므로 실제로 튜브의 항복강도가 그만큼 높게 된다고 할 수 있다. 그리고 튜브 외면과 튜브시트 홈 사이에 존재하는 이물질의 형상, 크기, 성분 등은 튜브와 튜브시트의 계면 분석에서 자세히 설명하고자 한다.

Fig. 8에는 5/8" 튜브 Mock-up에서 RDX 5.5, 3.5g/m의 화약을 사용하였을 경우의 튜브의 확관을 변화를 나타내었다. 5.5 g/m을 사용하였을 경우에는 확관을 변화가 없으나 8.5 g/m을 사용하였을 경우에는 평균 4% 정도의 확관을 얻을 수 있었다. 이것은 위의 3/4" 튜브의 결과와 같다고 생각된다.

따라서 일반적으로 4~8 %의 확관을 얻고자 할 경우에는 3/4" 튜브에서는 8.5 g/m가 적절하며, 5/8" 튜브에서는 8.5 g/m도 가능하나, 그보다 약간 높은 12.5 g/m가 좀 더 신뢰성이 높은 확관을 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 또한 폭발속도가 느린 저속 폭약을 사용할 경우에는 고속 폭약보다 화약량, 즉 충돌압력이 작아도 같은 확관을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

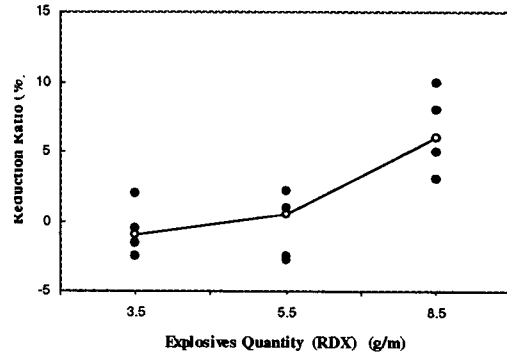


Fig. 7 Variation of reduction ratio of 3/4" tubes according to explosive quantity

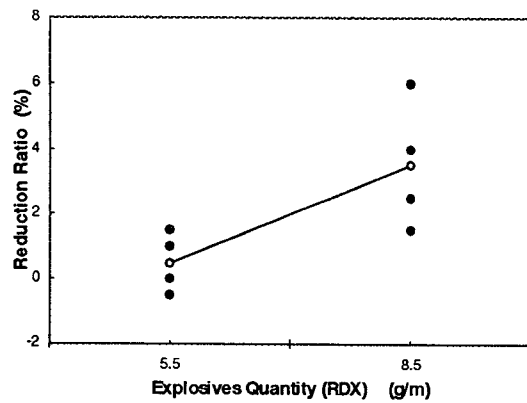


Fig. 8 Variation of reduction ratio of 5/8" tubes according to explosive quantity

### 3.3 폭발확관 및 물확관의 물리적 성질

#### 3.3.1 확관이 인발하중에 미치는 영향

Fig. 9는 3/4" 튜브 Mock-up의 인발 실험 결과로써 화약량이 증가함에 따라 인발하중이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 튜브와 튜브시트 계면 사이에 확관의 증가함에 따라, 밀착도가 증가함으로써 인발하중이 증가하는 것으로 볼 수 있다. 또한 3/4" 튜브에서는 튜브시트와 튜브의 끝부분에 내수압강도 및 인발하중을 높이기 위해 간격 6.4mm, 폭 3.2mm, 깊이 0.4mm의 Groove 2개를 가공하였는데, 화약량이 증가할수



특 튜브가 Groove 내로 더욱 많이 확관되므로 인발하중이 높아지는 것으로 판단된다.

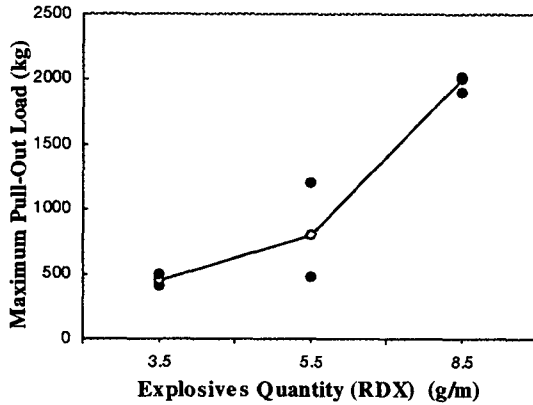


Fig. 9 Results of pull-out load of 3/4" tubes of nuclear steam generator

Fig. 10은 폭발확관과 롤확관의 인발 실험 결과로써 롤확관의 경우에 있어 Groove 내에 확관이 많이 일어나지 않았지만 인발하중이 높은 것은 Groove 부분이 아닌 확관 계면 부분의 불균일한 응력 집중이 마찰력을 증가시켰으리라 생각된다. 이는 Fig. 12의 Groove가 없는 5/8" 튜브의 인발 실험 결과에서도 알 수 있듯이 8.5 g/m 보다 롤확관의 인발하중이 높게 나타났다.

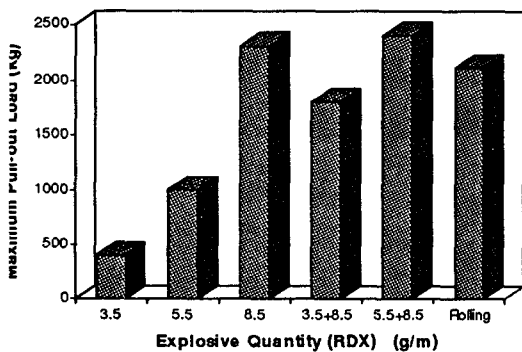


Fig. 10 Pull-out loads of explosive and roller expansions for 3/4" tubes

Fig. 11은 5/8" 튜브 Mock-up의 인발 실험 결과이다. 이것은 3/4" 튜브 Mock-up과는 달리 튜브 두께가 두꺼우므로 RDX 5.5g/m 이상의 화약만 사용하였으며, 5.5 g/m와 8.5 g/m 사이의 인발하중 차가 크지 않았다. 이는 3/4" 튜브와는 달리 튜브시트 끝부분에 Groove가 없기 때문에 튜브시트 홀과 튜브 확관 계면의 마찰력으로만 하중을 견뎌야 하기 때문이다. 또한 인발하중이 3/4" 튜브보다 높은 것은 튜브시트 두께가 두껍기 때문이다.

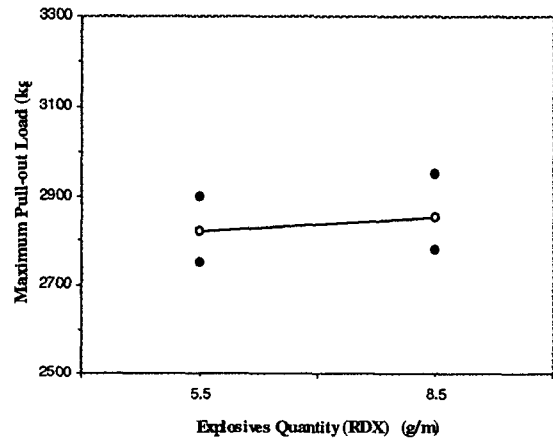


Fig. 11 Pull-out loads of 5/8" tubes

이상의 실험결과를 통해 화약량이 증가할수록 즉 확관율이 증가할수록 튜브의 영구 소성 변형이 커짐과 동시에 튜브시트 홀의 탄성변형 회복율이 커진다. 이로 인해 튜브와 튜브시트의 계면 사이에 잔류압축 Hoop Stress가 커지게 됨으로써 튜브와 튜브시트 사이의 밀착도는 높아지며, 즉 계면사이의 Clearance Gap은 작아지고, 인발하중은 증가 하는 것을 알 수 있었다. 또한 3/4" 튜브에서는 인발하중에 미치는 Groove는 매우 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 특히 롤확관에서는 불균일한 확관으로 튜브내에 잔류응력이 높은 것을 알 수 있었다.

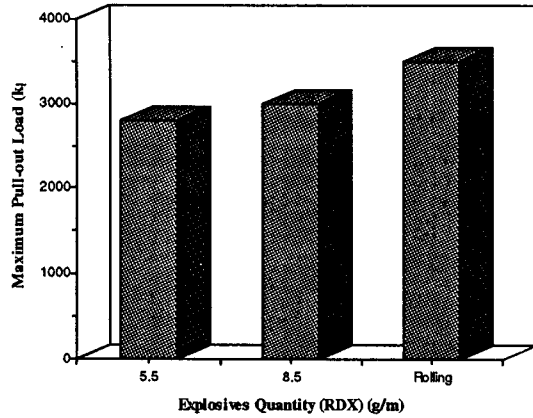


Fig. 12 Pull-out loads of explosive and roller expanding for 5/8" tubes

### 3.4 화약량이 내수압(Hydraulic Pressure) 강도에 미치는 영향

3/4" 튜브 Mock-up의 수압시험시 폭발확관과 롤확관된 튜브 모두 500kg/cm<sup>2</sup>까지는 Leak가 발생하지 않았으며, 500kg/cm<sup>2</sup> 이상에서는 튜브의 Bulging 현상으로 더 이상 실험할 수 없었다. Fig. 13은 5/8" 튜브에서 화약량 변화에 따라 Leak가 발생하는 압력의 변화를 보여주는 것인데 화약량이 증가함에 따라 확관 계면 사이의 밀착도가 높아지므로 Leak가 발생하는 압력이 증가하는 것을 보여주고 있다. 3/4" 튜브 Mock-up에서 Leak가 발생되지 않는 이유는 Leak 방지를 위한 튜브시트 Groove의 영향 때문이며, 5/8" 튜브는 Groove가 없기 때문에 200~500kg/cm<sup>2</sup> 사이에서 Leak가 발생하고 그 대신에 Leak 방지를 위해 용접을 하고 있다.

이상의 실험 결과로 보아 화약량이 증가함에 따라 Leak 발생에 대한 내수압 허용압력은 증가하며, 3/4" 튜브에서는 Groove를 만듦으로써 Leak를 방지할 수 있었고, 5/8" 튜브에서는 500kg/cm<sup>2</sup> 이하에서 Leak가 생기는 것으로 보아

튜브시트 끝부분에서의 용접은 계속되어야 한다는 것을 확인할 수 있었다.

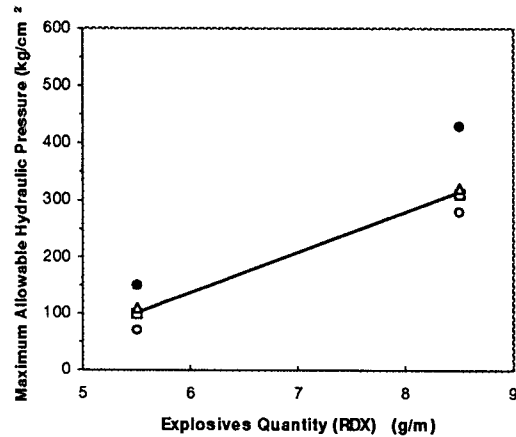


Fig. 13 Results of hydraulic pressure tests of 5/8" tubes

### 3.5 확관후의 미소경도(Micro Vickers Hrdness) 변화

Fig. 15은 Fig. 14에서 나타낸 튜브위치에서 측정된 미소 경도값이다. 폭발 확관한 튜브에서는 튜브시트 횡단면에 걸쳐 경도값이 비교적 균일하게 나타나고 있으나 롤확관한 튜브에서는 위치에 따라 경도값의 변화가 크게 나타나고 있다. 이러한 이유는 앞에서 설명한 인발시험, 수압실험 결과에서도 알 수 있듯이 폭발확관의 경우에는 폭발력이 튜브 전부분에 균등하게 작용하므로 경도치의 변화가 적지만 롤확관의 경우에는 확관이 20mm 간격으로 여러 단계에 걸쳐 이루어지므로 각 단계마다 일정한 확관이 이루어지지 않았다는 것을 의미한다. 따라서 불균일한 경도치의 변화는 튜브내에 응력집중 현상이 발생하므로 SCC로 인한 튜브 파손율은 상대적으로 높아질 것으로 사료된다.

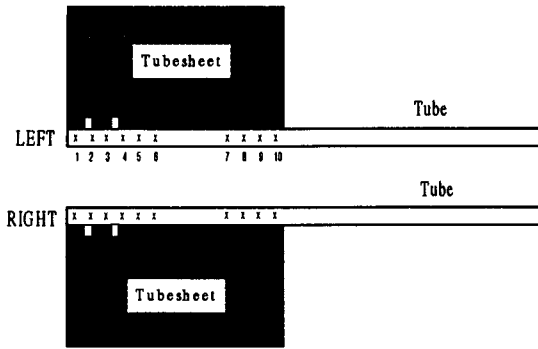
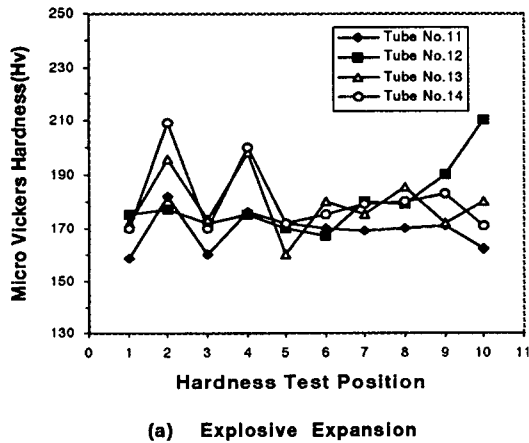


Fig. 14 Positions of the micro vickers hardness test



(a) Explosive Expansion

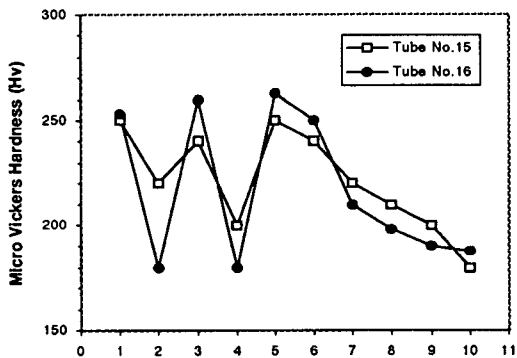


Fig. 15 Variations of the hardness values according to positions of the 3/4" tubes

### 3.6 튜브/튜브시트 확관 계면 분석

#### 3.6.1 확관 계면의 Clearance Gap 측정

Photo. 2와 Photo. 3은 폭발 및 롤확관후 튜브시트 홀과 튜브 사이를 주사전자현미경(SEM)을 통해 관찰한 결과이다. Photo. 2와 Photo. 3에서 볼 수 있듯이 약 20~50mm의 Clearance Gap을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 폭발확관의 경우에는 아래의 2가지 이유 때문이라고 사료된다.

#### A. 튜브시트 홀과 튜브 사이의 공기 영향

폭약의 폭발속도(8,400m/sec)가 매우 빨라서 폭발시 계면에 잔존하고 있는 공기가 미처 빠져나가지 못하고 확관을 방해하는 역할을 한다고 생각되며, 이와 같은 사실은 계면 사이의 간격이 확관전의 300mm에서 20mm로 줄어들고, 즉 튜브가 확관되고 그 안의 공기가 0~25% 정도만 외부로 방출된다고 가정하였을 때 순간 압축된 내부 공기의 압력이 15~19kg/mm<sup>2</sup>이 되어 튜브의 항복강도를 상승시키는 효과 때문에 확관을 방해한다고 할 수 있다.

#### B. 확관 계면 사이의 불순물 영향

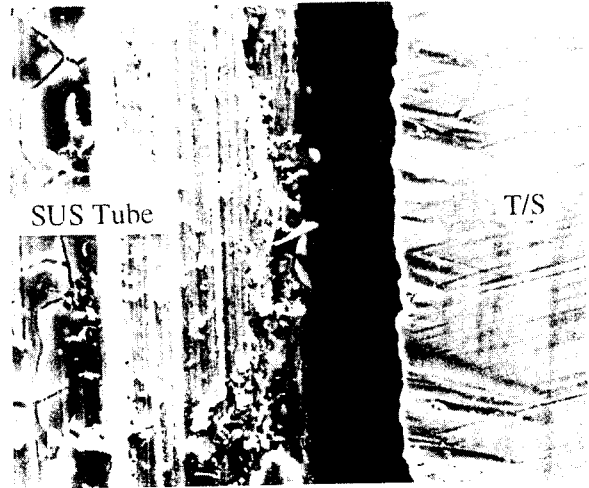
확관 계면 사이에 잔존하는 불순물이 확관하는 튜브와 접촉되어 튜브의 확관을 방해한다고 할 수 있다. 롤 확관에서는 이와같은 불순물의 영향으로 완전한 밀착을 얻기 어려운 것으로 사료된다. 따라서 위와 같이 Clearance Gap이 클 경우에는 Gap 사이로 부식산화물 등이 축적되며, 확관으로 생성된 튜브내의 잔류 응력 부위에 응력 부식을 촉진시켜 주는 부식환경이 형성될 수 있으므로 틈새를 최소화 시켜야 할 것이다.

### 3.7 폭발접합시 주변 Ligament에 미치는 영향

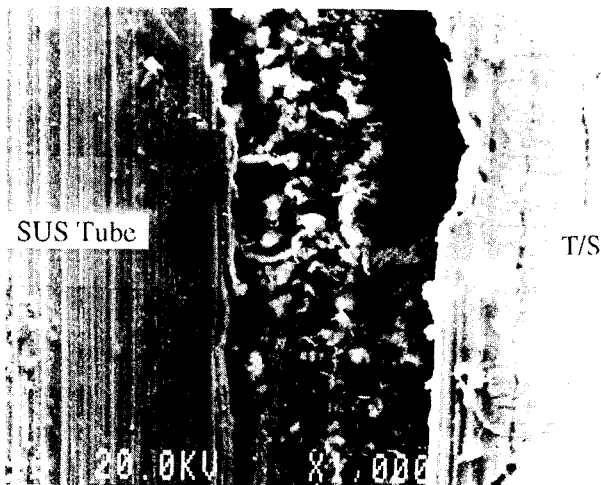
폭발 확관 작업시 폭약의 폭발력에 의해 인접 튜브시트 홀에 변형이 생길 수 있다고 여러 연구결과에서 보고하고 있다.<sup>16~17)</sup> 즉 튜브시트 홀 간격(Ligament)이 튜브 두께에 대해 임계치 이



(a) RDX 5.5g/m



(a) RDX 5.5g/m



(b) Roller Expansion



(b) Roller Expansion

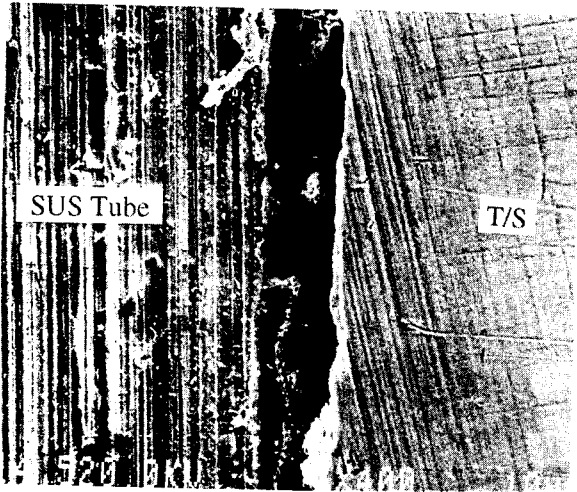
Photo 2. Clearance gaps of 3/4" tubes of nuclear steam Generator

Photo. 3 Clearance gaps of 5/8" tubes of nuclear steam generator

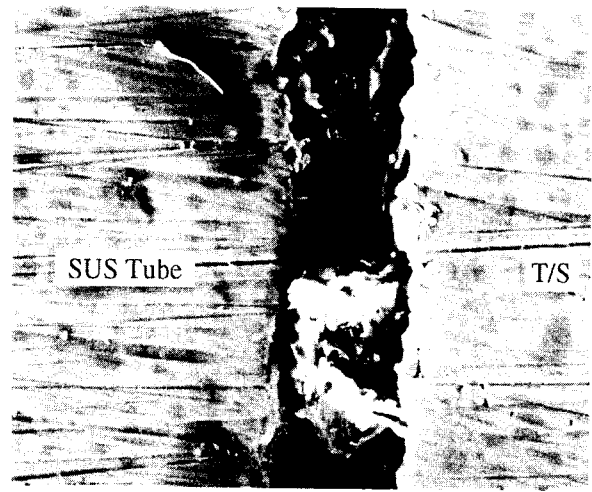
하일 경우 폭발압력이 튜브시트의 변형을 유발할 수 있기 때문이다.

물론 이때는 확관과 달리 많은 폭약을 사용하는 폭발용접을 할 경우이지만 확관 공정을 적용할

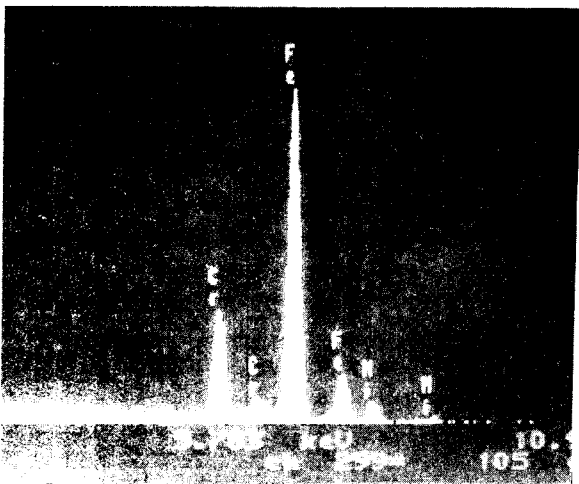
경우에도 고려해 볼 필요가 있다고 생각되어 본 연구에 사용된 Mock-up에서 인접 튜브시트 홀 직경의 치수 변형 여부를 조사한 결과, 3/4" 튜브 Mock-up에서는 3.5, 5.5 g/m을 사용했을 때



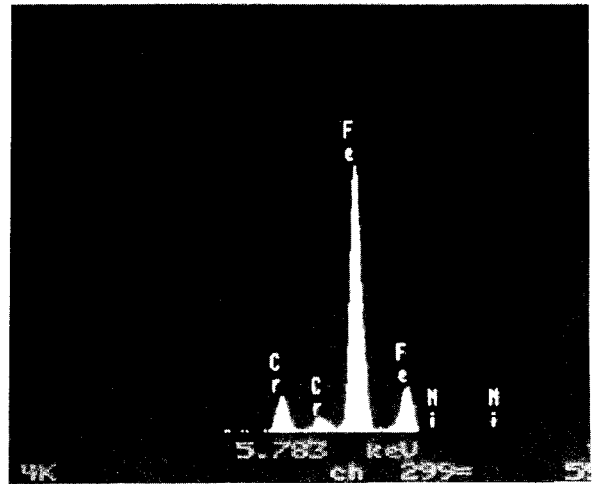
(a) Microstructure of tube/tubesheet interface



(a) Microstructure of tube/tubesheet interface



(B) EPMA of impurities



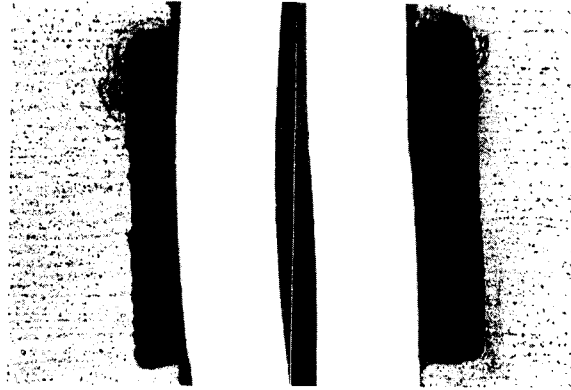
(B) RDX 5.5 g/m

Photo. 4 Microstructure of impurity of tube/tubesheet interface for 3/4" tubes

Photo. 5 Microstructure of impurity of tube/tubesheet interface for 5/8" tubes

튜브시트 홀 치수변화가 거의 20mm 이내이므로 인접 홀에 영향을 미치지 않았다. 반면 5/8" 튜브 Mock-up에서 5.5 g/m을 사용하였을 때에 치수변화가 거의 20mm이내이지만 8.5g/m을 사용

했을 경우에는 치수변화가 20~50mm이었다. 그리고 튜브의 주변에 폭발 확산된 튜브가 많을 경우 치수는 50mm 이상 변형이 일어난 것으로 나타났다.



(A) RDX 3.5 g/m



(B) RDX 5.5 g/m

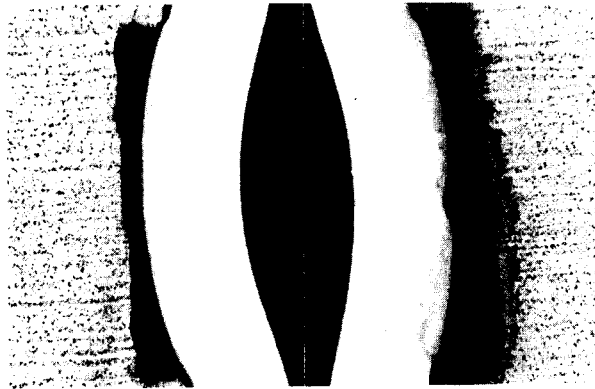
따라서 튜브와 튜브시트 홀의 반경차가 50mm 이상이므로 확관의 어려움은 없을 것으로 보이며, 만일 이러한 튜브시트 홀 직경의 칫수 변화에 대비하기 위해서 확관전에 튜브를 미리 삽입시켜 놓는다면, 변형이 크게 일어나더라도 확관 작업에 장애는 발생하지 않으리라 사료된다.

### 3. 8 폭약량이 튜브의 Groove 밀착에 미치는 영향

Photo. 6은 3/4" 튜브 Mock-up의 튜브시트 전면으로부터 6.4mm 떨어진 깊이 0.4mm, 폭 3.2mm인 Groove부위의 횡단면 Macro 사진이며, Table. 2는 폭발확관과 롤확관 사이의 Groove부위의 밀착도 등을 서로 비교한 결과이다. Photo.

6과 Table. 2의 결과에서 알 수 있듯이, 폭약량이 증가함에 따라 튜브와 Groove와의 밀착도는 좋아지고 있으며, 롤확관에서는 확관이 폭발확관에 비해 높지만 Groove와의 밀착도는 양호하지 못한 것을 보여주고 있다.

이러한 이유는 롤확관이 Groove내로 튜브를 확관 시킬 수 없는 특성을 가지고 있기 때문이며, 반면에 폭발확관을 시킬 경우에는 폭약의 폭발력이 튜브의 전 부분에 걸쳐 균일하게 작용하기 때문에 Groove내로 튜브를 깊이 변형시킬 수 있다는 점이다. Photo. 6에서 볼 수 있듯이 Groove 내에는 잔존 공간이 많이 존재하며, 이 잔존공간을 점유하고 있는 일종의 압축공기는



(C) RDX 8.5 g/m



(D) Roller Expansion

Photo. 6 Internal of groove for 3/4" tube(×20)

Groove부위에 변형된 튜브내의 잔류응력과 어울려 응력 부식을 촉진시켜 튜브 파손의 원인이 될 수 있기 때문에 Groove 내에 형성될 수 있는 잔존공간 및 공기를 감소시키기 위해서는 Groove 깊이에 대한 보다 자세한 검토가 필요하다고 생각된다.

### 3. 9 잔류응력의 측정 및 해석

#### 3.9.1 튜브/튜브시트 접합부위 잔류응력

튜브를 튜브시트 홀 내에 삽입한 후 튜브 확관 과정 중에 튜브자체의 소성변형, 즉 기본적으로 튜브와 튜브시트 홀과의 유효간격 만큼이

나 튜브시트의 구속 등에 의해 튜브에는 잔류응력이 도입되는데 확관후 튜브에 도입되는 잔류응력은 크게 다음 두가지 형태의 응력으로 대별할 수 있다고 사료된다.

#### A. 구속응력(Interference Stress)

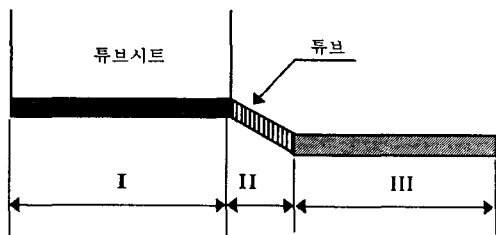
튜브가 튜브시트 홀 내에서 확관된후 튜브가 튜브시트에 구속됨으로써 튜브시트가 튜브에 가하는 응력, 즉, 튜브/튜브시트 상호작용에 의해 튜브에 부가되는 응력. 이는 Strain Gauge를 튜브 내부에 부착한 후 튜브시트 Mock-Up Block을 제거시킬 때 해방되는 응력값으로 산출한다.

항목 \ 방법	폭발확관		롤확관 (확관율 : 3.8%)
	3.5g/m	5.5g/m	
밀착상태(m) (Clearance Gap)	60 ~ 65	55	50~55
확관율(%) (두께 감소율)	1.1 ~ 2.3	1.0~ 2.9	3.4~ 8.6
Groove 깊이 잔존율	118/460440/485	206 / 520270/440)	360/425/400/4 55
Groove잔존깊이	0.41044	0.26027	0.39040

Table. 2 The comparison of adherence rate of tube expansion ratio on groove region

B. 튜브자체 순수 잔류 응력(Residual Stress)

튜브가 튜브시트 홀 내에서 유효간격 만큼 확관될 때, 튜브가 소성변형 되면서 튜브내부에 도입되는 잔류응력. 이는 X-Ray 응력측정(외면)과 전해연마(내면) 등을 통해 응력값을 측정한다. 따라서 확관 과정중 튜브에 부가되는 총 잔류응력은 위의 A의 구속응력과 B의 튜브자체의 소



I : 균일 확관 부분 (Uniform Expanded Zone)  
 II : 천이부분 (Transition Zone)  
 III : 미 확관부분 (Unexpanded Zone)

Fig. 16 The outline of expansion region on tube and tubesheet

성변형에 의해 도입되는 순수 잔류 응력을 향한 값으로 정의할 수 있다고 사료되며, 향후 확관 과정중 튜브에 도입되는 총 잔류응력은 이 값으로 정의하고 이를 실험적 측정을 통해 조사해보고 확관 방법별로 도입되는 잔류응력의 상대적인 차이 등을 고찰하였다.

3.9.2 잔류응력의 측정

Fig. 16에 나타내었듯이 튜브/튜브시트 확관 Mock-Up 시험편에서 균일확관 지점과 천이지점에 대하여 확관 방법별로 구속응력과 튜브자체 순수잔류응력을 다음의 세단계를 통해 응력측정을 실시하였다.

A. 구속잔류응력 측정

Fig. 17과 같이 롤, 폭발확관한 Mock-Up 시험각각에 대하여 튜브내면의 균일 확관 지점과 천이 지점에 Lead Wire가 달린 Strain Gauge를 부착하고 이를 Data Logger와 연결시킨 후 튜브시트 Mock-Up Block을 그림과 같이 하중을 가해 제거함으로써 이때 해방되는 응력정도를 Strain Gauge와 연결된 응력측정시스템을 이용해서 측정한다.

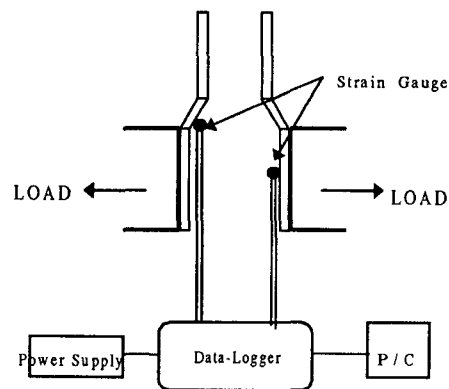


Fig. 17 The outline of measurement on interference residual stress



B. 튜브자체 순수잔류응력

1) 튜브외면 잔류응력

앞의 구속응력 측정의 다음 단계로 튜브시트 Mock-Up Block을 제거한 Free Tube 외면을 깨끗하게 세척한 후 튜브외면의 균일 확관 부분과 천이 지점에서의 순수 튜브외면 잔류응력을 X-Ray를 통해 측정하였다. 실험에 사용한 X-Ray 장비는 Rigaku MSF-2M 이었으며, 튜브 소재가 Inconel 600 fcc격자이므로 (420) Plane 회절을 이용하였고, 사용된 Target은 Copper이었다. 또한 입사각 각도는 0°, 15°, 30°, 45°의 4가지로 변화시켜 가면서 실험을 실시하여 잔류응력을 측정하였다. 이때 Free Tube의 응력 측정 부위는 다음의 Fig. 18과 같다.

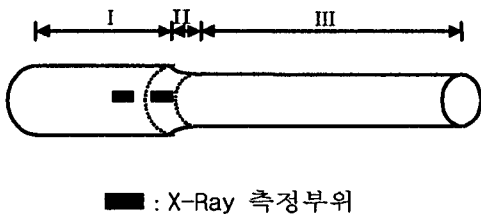


Fig. 18 The measurement of X-ray residual stress on tube outside

2) 튜브내면 잔류응력

튜브시트 Mock-Up Block을 제거한 Free Tube에 대하여 Fig. 19와 같이 전해연마용 탱크에 전해연마액을 적당한 양만큼 채우고 튜브 내면의 균일확관 부분과 천이지점에 응력측정용 Strain Gauge를 부착한 Free Tube를 담근 후 전해 연마를 실시한다. 이때 튜브외면이 계속적으로 연마될 때 해소되는 응력 정도를 Strain Gauge와 연결된 응력측정시스템을 이용하여 측정하는데, 단 튜브 내면으로는 전해액이 침투되지 못하도록 고무패킹(Rubber Packing)으로 완전 밀봉한 후 실험을 하였다.

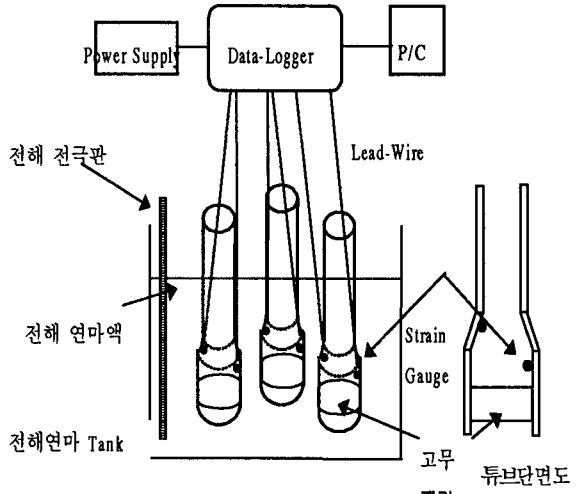


Fig. 19 The outline figure of tube inside residual stress

- I. 균일확관부분(Uniform Expanded Zone)
- II. 천이부분(Transition Zone)
- III. 미확관부분(Unexpanded Zone)

3.9.3 잔류응력 측정 결과

앞에서 상술한 잔류응력 측정 방법으로 롤 및 폭발확관 Mock-Up 시편에 대하여 구속 잔류 응력과 튜브 내, 외면 순수 잔류 응력을 측정된 결과를 종합해 보면 아래의 Table. 3과 같다. Table. 3에서 알 수 있듯이 롤, 폭발확관 모두 대체로 튜브외면에서는 압축 잔류 응력이 튜브 내면에서는 인장 잔류 응력이 존재하는 것으로 나타났는데, 인장 잔류응력의 경우 튜브내면 천이 지점에서 롤확관은 튜브 항복강도의 대략 60% 정도, 폭발확관의 경우 튜브 항복강도의 대략 40% 정도 존재하는 것으로 측정되었으며, 전체

응력값		균일 확관 과정		천이 지점	
시편종류		$\sigma_{\theta\theta}$	$\sigma_{zz}$	$\sigma_{\theta\theta}$	$\sigma_{zz}$
롤 확관	내면	+0.22	+0.35	+0.46	+0.59
	외면	-0.47	-0.63	-0.39	-0.28
폭발확관	내면	+0.15	+0.20	+0.37	+0.31
	외면	-0.59	-0.55	-0.43	-0.36

\* 축방향 응력 :  $\sigma_{\theta\theta}$  원주방향 응력 :  $\sigma_{zz}$   
YS : 28kg/mm<sup>2</sup> (튜브 항복강도)

Table. 3 The Comparison of residual stress of inside and outside tube on expansion method

적으로 튜브내면에서 폭발확관의 경우가 롤확관의 경우보다 잔류응력이 낮게 나타났는데 이는 앞서서도 고찰하였듯이 폭발확관 방법은 튜브시트 전 범위에서 균일한 확관 압력이 작용하고, 확관시 부가하중 접촉의 측면에서도 상대적으로 유리하므로 잔류응력이 낮게 걸리는 것으로 사료된다. 또한 위의 Table. 3에서 알 수 있는 중요한 결과는 천이지점에서의 잔류응력이 균일확관 부분보다 높게 걸린다는 것인데 이를 통해 천이지점이 SCC에 보다 민감할 것으로 사료된다.

이상의 결과로 비추어 확관시 도입되는 잔류응력이 폭발확관의 경우가 상대적으로 롤확관의 경우보다 적으므로 실제 증기발생기 운전시 SCC 저항성이 증가할 것으로 기대되며 따라서 작업성 뿐만 아니라 증기발생기의 사용수명 측면에서도 폭발확관 방법이 보다 우수한 확관법이라 사료된다.

#### 4. 결 론

원자력 증기발생기의 튜브와 튜브시트의 기존의 Roll Expander에 의한 기계적인 확관법의 문

제점을 해결하기 위하여 원자력 증기발생기 튜브의 외경이 19.05mm(3/4") 및 15.88mm(5/8") 사이인 튜브의 폭발확관과 롤확관에 의한 실험을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

#### 1. 폭약량과 확관율과의 관계

폭약량이 증가함에 따라 확관율은 3~8% 범위 내에서 직선적으로 증가하였고, 폭약량 3.5~ 8.5 g/m을 사용할 경우 폭발시 주변의 튜브나 튜브시트 홀 등의 Ligament에 큰 영향을 주지 않고 요구하는 확관율을 얻을 수 있었다. 또한 확관율이 증가할수록, 즉 폭약량이 증가할수록 내수압 강도는 폭발확관의 경우 증기발생기의 운전내수압 173kg/cm<sup>2</sup> 보다 훨씬 높은 약 500kg/cm<sup>2</sup>로서 100~200kg/cm<sup>2</sup> 인 Roll에 의한 기계확관의 경우보다 튜브와 튜브시트의 기밀성이 2배 이상 뛰어나음을 알 수 있었다. 그리고, 접합부의 미세 조직 및 튜브 내.외면의 잔류응력 측정을 통한 응력 부식 파괴 특성을 조사한 결과 폭발확관은 천이영역이 완만하여 Roll확관에 비해 응력부식 파괴 저항성이 약 30% 정도 증가함을 알 수 있었다.

#### 2. 폭발확관과 기계적인 확관과의 관계

현재 Plugging 및 Sleeving 공정에서 활용되는 기계적인 롤확관 방법보다 폭발확관 방법이 매우 우수하며, 균일한 접합부를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 접합 계면의 가공경화가 적으므로 운전중 SCC가 발생할 가능성이 적어질 것으로 사료되며, 폭발확관의 경우에 폭약량을 5.5 g/m 이상 사용하면 평균 850kg정도로 기계적인 롤확관과 동일한 인발하중 및 내수압강도를 얻을 수 있었다.

#### 5. 참고문헌

- (1) M. D. Chadwick, P. W. Jackson : Explosive welding in pressure vessels and heat exchangers, Development in Pressure Vessel Tech, Applied Science Pub, Vol. 3, (1980), pp. 217-265
- (2) A. S. Bahrani, T. J. Block, B. Crossland : The mechanics of wave formation in explosive welding, Proc. R. Soc., A296, (1967), pp123-136
- (3) K.T. Christensen, N. S. Egly, L. Alting : Explosive welding of tubes to tube-plates. Metall. Constr. Br. Weld J, Vol. 5, No.11 (1973), pp. 412-419
- (4) J. C. Turner, P. H. dawson : Explosive welding as a manufacturing technique, Ibid, Reference 42, Paper 42
- (5) D. J. Brown, O. J. Dunmore : Explosive expansion of tubes in tube-plates, Ibid, Reference 29, No. 19, pp.1-4
- (6) G. Verzeletti, M. Montanami, G. Beghi, P. Golinelli : Explosive welding of nuclear reactor materials. Ibid, Reference 29, No. 19, pp.1-8
- (7) H. Hampel : Some aspects of explosive tube to tubeplate welding in heat exchangers, 7th Int. Conf. on High Rate Energy Fab., (1981), pp.173-185
- (8) J. W. Schroeder : The use of explosive forming for fastening and Joining structural and pressure components, Technologies for the 1990s Conf., 10, (1984), pp. 177-184
- (9) M. D. Chadwick : Pipe to pipe welding by explosives, pp.31-38
- (10) M. D. Chadwick, P. W. Jackson : Explosive welding of tubes and tubeplates, Brit. Weld, J., October (1968), pp.480-492
- (11) J. Willis : Applications of explosive welding : pp.40-44
- (12) 加賀精一 : 最近の爆着技術の動向, 配管技術, Vol. 24, No. 1, (1986), pp.51-60
- (13) 恩涙忠南, 爆発溶接の接合界面における波形形成機構について, メタルと火薬, No.23, (1980)
- (14) G. Arthur : Applications of explosive welding to heat exchangers, Materials & design, Vol.6, No.1, (1985), pp. 37-41
- (15) V. G. Dmitriev, V. T. Platonnako, V. P. Kolmakov : Determining the impact parameters when tubes are welded to tube plates by the electrical explosion of wire, Avt. Svarka, (1981), No. 9, pp.33-35
- (16) P. Redshaw, A. W. Stalker, K. Allen : Explosive Welding-The deepwater pipeline connection/repair solution, Offshore Technology Conference, (1978),pp.2581-2589
- (17) W. R. Apblett : Innovations in Joining / Fabrication Techniques, Foster wheeler development Corporation, pp.120-126
- (18) Detnaform : Explosive Forming[A proven Method of feedwater heater repair in the field]