

## 폭발접합된 열교환기류 튜브와 튜브시트의 계면 특성에 관한 고찰

이 병 일 · 공 창 식 · 이 상 철\*

\*한국중공업(주) 기술연구원

### A Study on the Tube/tubesheet Interface in the Heat Exchangers Joined by Explosive Bonding

Byung-II Lee, Chang-Sig Kong and Sang-Cheol Lee\*

\* R&D Center, Korea Heavy Industries & Construction Co., Changwon 641-792, Korea

#### Abstract

Characteristics of the interface between tube and tube sheet which were formed by explosive expansion and roll expansion, have been studied in the research. The results are as follows:

Optimum amounts of explosives for the expansion of Alloy 600 (19.05mm and 15.88mm) were found to be RDX 3.5-8.5g/m. Because explosive expansion caused less strain hardening and increased bonding strength, characteristics of the explosively expanded were better than those of mechanically expanded.

As the transition region of the explosive expansion is inactive, the resistance to the stress corrosion cracking increases by 30~40% compared to the roll and hydraulic expansion.

(Received October 21, 1999)

Key Words : Explosive expansion, RDX(Hexogen:Explosive), Sheath, Free expansion rate, Expansion ratio, Leakage tightness, Pull-out load, Clearance gap, Ligament, Groove, Residual stress

#### 1. 서 론

폭발확관기술은 1944년 Carl에 의해 최초로 학계에 보고된 이후 Philipchuk과 Bois 등에 의해 현상학적이고, 이론적인 규명을 하기 시작하였다. 폭발확관은 폭발이 일어나는 순간 초고압을 이용하여 튜브를 확관시키는 방법으로서, 이것은 폭발용접에서 요구하는 폭발속도와는 다르며, 튜브와 튜브시트의 계면 사이에 야금학적인 접합은 일어나지 않고 Pressurized Type의 Fitting 이라고 할 수 있다. 또한 롤 확관에서 얻을 수 있는 Fitting과 비교하여 좀 더 조밀하고 경제적인 Process로 알려져 있다<sup>1)</sup>.

Fig. 1은 롤확관, 폭발확관 및 수압확관시 튜브에 도입된 잔류응력과 부식성 분위기에서의 균열발생 가능성에 대한 상관 관계를 보여주는 비교 곡선이다<sup>2,3)</sup>.

Fig. 1에서 알 수 있듯이 폭발확관과 수압확관의 경우가 롤확관에 비하여 확관 동안 도입되는 잔류응력의 정도가 상당히 낮으며, 이에 따라 최초 균열이 발생하는데 걸리는 시간도 길어짐을 알 수 있다.

이상과 같이 폭발 확관은 화약의 균일한 폭발력을 이용함으로써 튜브에 상대적으로 적은 잔류응력이 존재하여 내부식 저항성이 뛰어난 확관 방법이라 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 화약의 폭발력을 이용하여 접합된 열교환기류 소재인 Alloy 600 튜브와 Mild Steel 튜브시트의 접합 계면의 특성을 평가하여 롤확관 및 수압확관과 비교하고자 한다.

#### 2. 실험방법

본 연구에서는 Mn 1.25, Cr 0.22 가 함유된 Mild Steel 튜브시트와 Cr 15.22, Ni 75.62의 SB163 Alloy 600 Seamless Mill annealed Tube를 사용

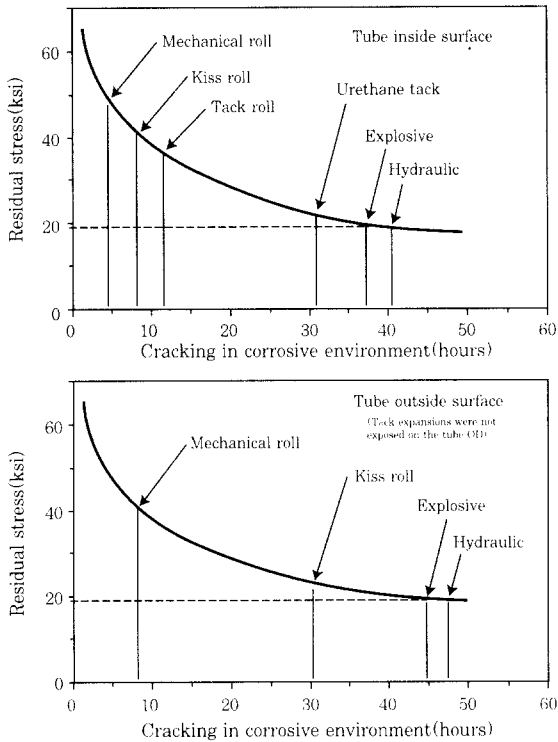


Fig. 1 Residual stress and time to crack curves of the expansion process

하였으며, 이때 튜브는 외경이 19.05mm(3/4")와 15.88mm(5/8")인 두 종류의 튜브를 사용하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 전형적인 Austenite 조직을 가진 Alloy 600 튜브의 미세조직을 나타내었다. 폭발확관에 사용된 시험편은 냉간가공한 후 1,090℃에서 열처리한 것으로서 항복강도가 24.6~28.1kg/mm<sup>2</sup>, 인장강도가 약 63/kg/mm<sup>2</sup>, 연신율이 약 47%인 것을 사용하였다.

또한, 본 연구에 사용된 화약은 균일한 폭발력을 가지는 RDX(Hexogen, (CH<sub>2</sub>NNO<sub>2</sub>)<sup>3</sup>) 화약이었으며, 1.5~8.5g/m 범위의 화약량을 사용하였다. 폭발력을 균일하게 튜브에 전달하기 위해 사용된 완충재(Sheath)는 폭발시 튜브 표면에 화약이 직접 닿지 않도록 하였다.

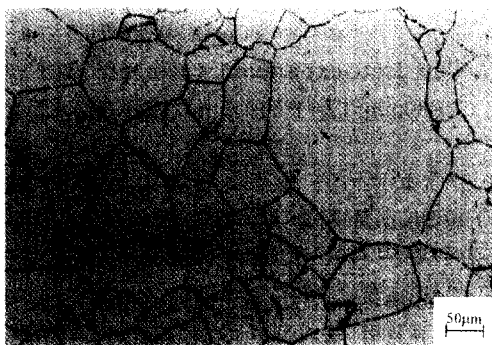


Fig. 2 Microstructure of Alloy 600 tubes

Fig.3은 튜브와 튜브시트의 폭발접합 과정을 나타낸 것으로서 화약을 가로 세로로 배열하여 한번의 폭발에 의해 약 50~200홀까지 접합이 되도록 구성하였다. 또한 화약 길이를 확관 길이 보다 적게 하여 튜브 끝단에서의 응력 발생을 방지하였다.

그리고, 튜브와 튜브시트의 폭발접합 실험을 하기 전에 튜브의 건전성을 평가하기 위하여 튜브의 자유 팽창율(Free Expansion Rate)을 조사하였다. 이때 사용된 튜브는 직경이 각각 19.05 및 15.88mm 인 5/8"(t=1.5494mm), 3/4"(t=0.889mm) 크기의 Alloy 600이었다. 이때 실험에 사용된 화약은 RDX 화약으로서 1.5, 3.5, 5.5, 8.5g/m의 범위의 것을 사용하였다.

Fig.4는 튜브의 자유확관율을 측정하기 위하여 Alloy 600 튜브에 튜브시트 없이 화약, 완충재, 뇌관, 도화선 등으로 된 Assembly를 조립하여 폭발확관하는 과정을 나타낸 것이다.

튜브와 튜브시트 접합 계면의 특성을 평가하기 위한

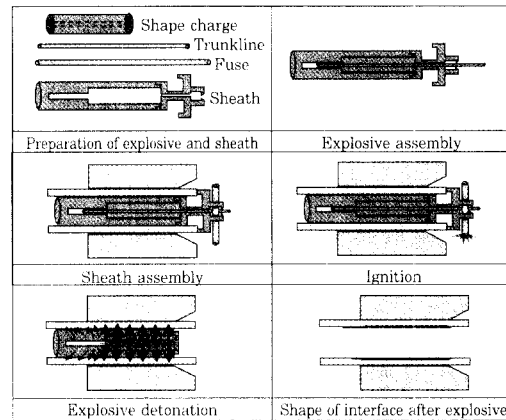


Fig. 3 Explosive expansion procedure

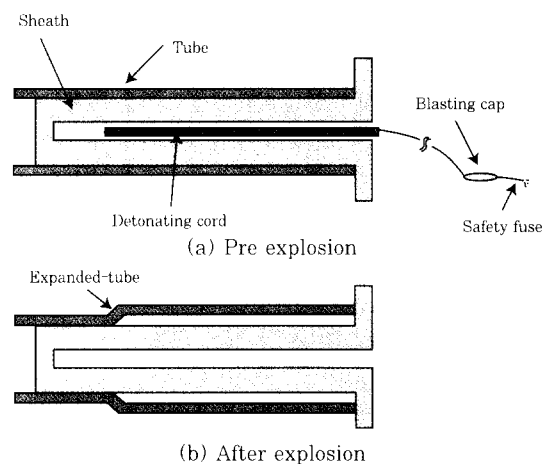


Fig. 4 Scheme of Free Explosive expansion mock-up test

폭발접합은 Fig. 5와 같이 튜브시트 홀 내에 튜브를 장착하고 그 안에 화약 조립체를 넣어 실험을 하였다.

또한, 접합 계면의 특성을 비교하기 위하여 물에 의한 기계적 확관법으로 3~8% 범위의 확관율로 확관을 실시하였으며, 폭발확관과 물확관의 내수압 강도를 측정하기 위하여 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, 인발 강도 시험을 위해 시험용 지그를 Mock-up Block과 조립하여 100 ton 인장시험기에서 그 값을 구하였다.

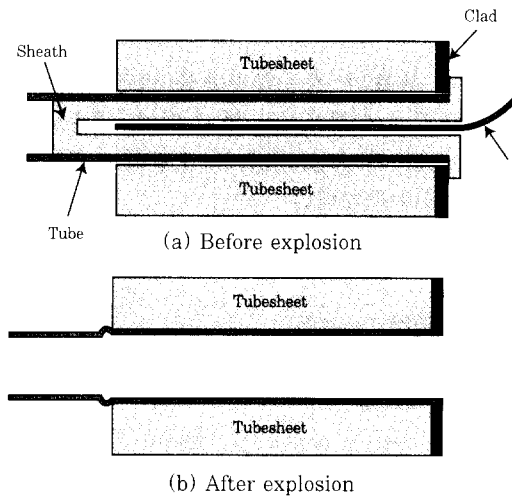


Fig. 5 Scheme of explosive expansion mock-up test

그리고, 폭발확관 및 물확관 후의 튜브 및 튜브시트의 경도 변화를 미소 경도 시험기를 이용하여 하중 500g, 유지 시간은 30초로 측정 하였으며, 튜브와 튜브시트 접합 계면의 Clearance Gap을 광학현미경(OM)과 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다. 또한 EPMA(Electro Probe Micro Analysis)를 이용하여 튜브와 튜브시트 접합 계면의 불순물을 조사하였다. 그리고, 튜브를 튜브시트 홀 내에 삽입한 후 튜브의 확관을 실시하면 확관 과정 중에 튜브 자체의 소성변형이나 튜브시트의 구속에 의해서 튜브에는 잔류응력이 발생되는데 확관 후 튜브 및 튜브시트에 도입되는 잔류응력을 X-Ray 및 전해연마 방법을 이용하여 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 화약량 변화에 따른 튜브의 자유 확관율

Fig. 6은 직경 3/4"이고 두께가 0.889mm인 Alloy 600 튜브의 RDX 화약을 사용하여 폭발한 후 튜브의

자유 확관율을 측정된 결과이다. RDX 화약량이 증가함에 따라 확관율은 증가하는 것으로 나타났으며, RDX 5.5g/m 이상에서는 화약의 폭발력에 의한 폭발압력이 튜브의 소성변형량을 초과하여 부분적으로 튜브에 Crack이 발생되는 것을 관찰 할 수가 있었다. 또한 RDX 8.5g/m을 사용했을 때는 즉, 확관율이 20%의 범위를 벗어남으로서 튜브의 완전 취성파괴가 일어남을 알 수 있었다.

Fig. 7은 튜브의 직경 5/8"이고 두께가 0.889mm, 1.5494mm인 두 종류의 시험편에 대하여 자유 확관율을 측정된 결과로서 Fig. 6의 3/4" 튜브와 같이 화약량이 증가함에 따라 확관율도 동시에 증가함을 알 수 있었다.

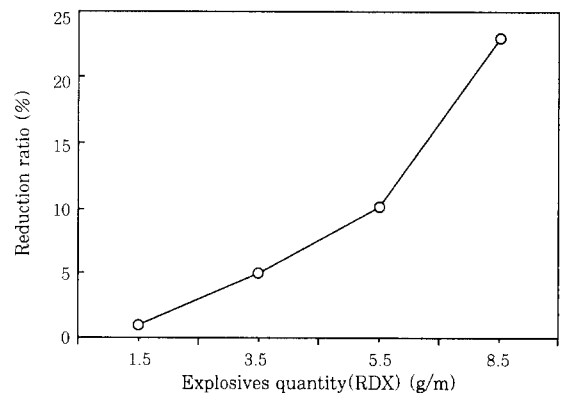


Fig. 6 The free expansion ratio of 3/4" Alloy 600 tubes

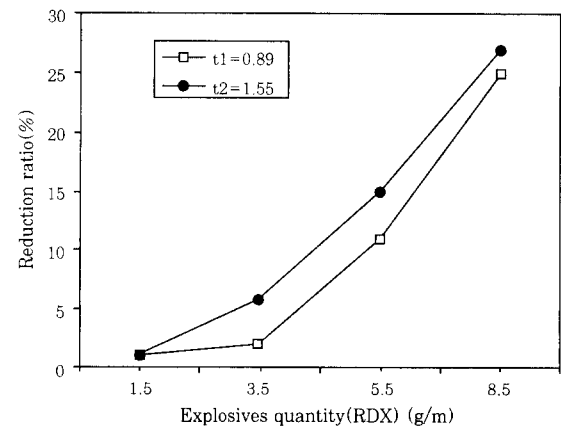


Fig. 7 The free expansion ratio of 5/8" (t1=0.889mm, t2=1.5494mm) Alloy 600 tubes

Fig. 6과 Fig. 7의 결과를 비교해 보면, 튜브의 두께가 0.889mm로 같을 경우에는 직경이 큰 3/4" 튜브가 직경이 작은 5/8" 튜브보다 확관율이 작으며, 두께가 1.5494mm로 두꺼운 경우에는 상대적으로 직경이 작은 5/8" 튜브의 확관율이 3/4" 튜브와 유사한 것을 알 수 있었다. 이와 같은 확관율의 차이를 튜브의 직경

과 관련하여 보면, 같은 양의 화약을 사용하였을 경우에 있어서 튜브의 직경이 클 때에는 튜브내에 삽입되는 완충재의 두께가 두꺼워져 폭발력에 따른 완충재의 충격 흡수율이 높아 상대적으로 튜브의 확관에 기여하는 폭발력이 줄어들기 때문이라고 사료된다.

따라서, RDX 화약량 변화에 따른 튜브의 자유 확관을 실험 결과로 보아 직경이 3/4" 및 5/8" 튜브의 폭발 접합에 사용될 수 있는 적정한 화약과 화약량은 RDX 3.5g/m에서 5.5g/m 까지 범위의 화약이 가장 우수한 접합 계면을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

### 3.2 화약량에 따른 Mock-up 튜브의 확관율

Fig. 8에는 두께가 0.889mm이고 직경이 19.05mm인 Alloy 600 3/4" 튜브를 튜브시트 Mock-up에서 RDX 3.5, 5.5, 8.5 g/m의 3가지 종류의 화약을 사용하여 RDX 화약량 변화에 따른 튜브의 확관율을 변화를 나타내었다. RDX 화약량이 1.5g/m에서 8.5g/m로 증가함에 따라 튜브의 두께 감소율이 상대적으로 증가하는 것으로 보아 튜브의 확관율도 증가함을 알 수 있었다.

또한 RDX 화약 3.5 및 5.5g/m를 사용하였을 경우에는 확관율이 1% 정도로서 크게 높지 않으나, RDX 8.5g/m를 사용하였을 경우에는 평균 7.5%의 높은 확관율을 얻을 수 있었다. 이것은 RDX 8.5g/m은 화약의 폭발에 의한 폭발압력, 즉 화약의 튜브에의 충돌압력이 3.5g/m과 5.5g/m보다 2~3배 정도 높기 때문에 압축공기의 저항과 불순물의 압축저항을 이겨내고 튜브와 튜브시트 사이의 밀착도를 높일 수 있었기 때문으로 사료된다.

Fig. 9는 5/8" 튜브 Mock-up에서 RDX 5.5, 8.5g/m의 화약을 사용하였을 경우의 튜브의 확관율 변화를 나타내었다. 5.5 g/m을 사용하였을 경우에는

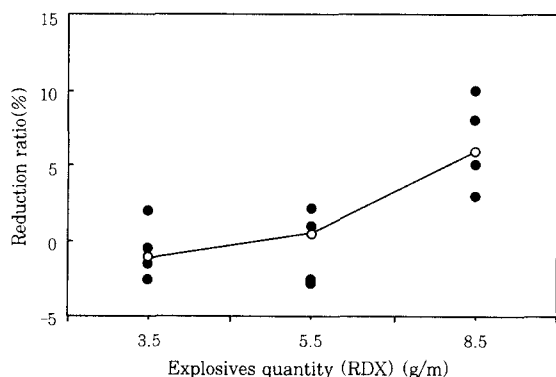


Fig. 8 Variation on reduction ratio of 3/4" tubes according to explosive quantity.

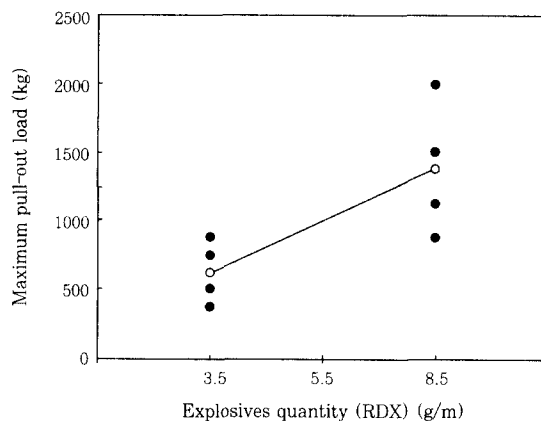


Fig. 9 Variation on reduction ratio of 5/8" tubes according to explosive quantity.

확관을 변화가 없으나 8.5 g/m을 사용하였을 경우에는 평균 4% 정도의 확관율을 얻을 수 있었다. 이것은 직경이 3/4" 튜브의 자유 확관율의 결과와도 잘 일치한다.

따라서, 일반적으로 가장 우수한 접합 강도를 얻을 수 있는 확관율은 4~8 %이므로 최적의 화약량은 3/4" 및 5/8" 튜브 공히 RDX 8.5 g/m의 화약을 사용하는 것이 적정 확관율에 의한 우수한 접합 특성을 가질 수 있을 것으로 사료된다. 또한 폭발속도가 느린 저속 폭약을 사용할 경우에는 고속 폭약보다 화약량, 즉 충돌압력이 작아도 같은 확관율을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

### 3.3 폭발확관 및 롤확관에 의한 튜브와 튜브시트의 접합 계면 특성

#### 3.3.1 인발강도에 미치는 확관을 영향

Fig. 10은 두께 0.889mm이고 직경이 19.05mm인 3/4" 튜브 Mock-up의 인발 실험 결과로서 RDX 화약량이 1.5g/m에서 8.5g/m로 화약량이 증가함에 따라 인발 하중은 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 튜브와 튜브시트 계면 사이에 화약량이 증가함에 따라 확관율이 증가함으로, 확관을 증가에 따른 접합 계면의 밀착도가 증가함으로써 인발하중이 상대적으로 증가하는 것으로 사료된다.

따라서, 화약량이 증가할수록 즉, 튜브와 튜브시트와의 밀착도가 증가함으로써 튜브가 Groove내로의 확관율이 높기 때문에 인발 강도가 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 11은 3/4" 튜브의 튜브시트와의 접합에 폭발확관과 롤확관을 사용한 경우의 접합부의 인발강도를 서로 비교한 것이다. Fig.11에서와 같이 롤확관의 경우

에 있어 튜브가 Groove 내로의 확관되는 확관율이 폭발확관에 비해서는 작지만 인발 강도 값이 높게 나타나는 이유는 Groove 부분이 아닌 확관 계면 부분에서의 단계적인 접합에 따른 불균일한 응력 집중이 튜브와 튜브시트의 마찰력을 증가시키기 때문이라고 생각된다.

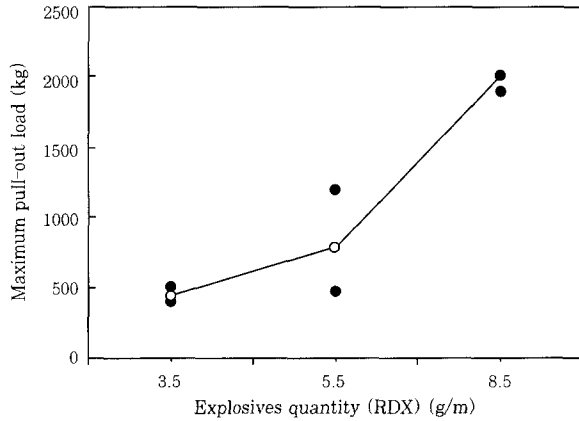


Fig. 10 Pull-out load of 3/4" Alloy 600 tubes

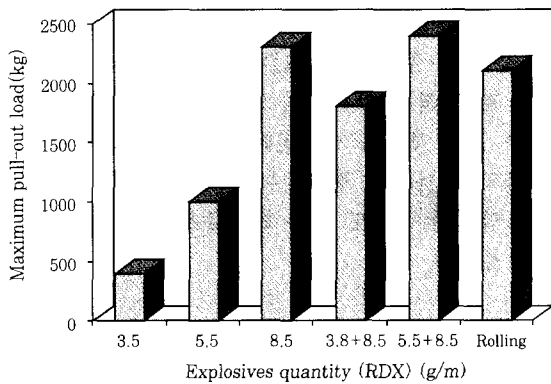


Fig. 11 Relationship between Pull-out loads of explosive and roller expansions for 3/4" tubes

Fig. 12은 5/8" 튜브 Mock-up의 인발 실험 결과이다. 이것은 3/4" 튜브와는 달리 튜브 두께가 두꺼우므로 RDX 5.5 g/m와 8.5 g/m 사이에서의 인발 강도 값의 차이는 크지 않았다. 그 이유는 이는 3/4" 튜브와는 달리 튜브시트 끝부분에 Groove가 없기 때문에 폭발확관 동안 튜브시트 홀과 튜브 확관 계면의 마찰력으로부터만 폭발 하중을 견뎌야 하기 때문이다. 또한 인발 하중이 3/4" 튜브보다 높은 것은 튜브가 두껍기 때문에 동일한 화약량에서 튜브와 튜브시트의 밀착도가 상대적으로 커지기 때문인 것으로 생각된다.

이상의 실험결과를 통해 화약량이 증가함에 따라 즉, 확관율이 증가하는 것은 튜브의 영구 소성 변형이 커짐과 동시에 튜브시트 홀의 탄성변형 회복율이 커진다는 Dmitriev와 Apblett<sup>4,5)</sup> 의 이론과도 잘 일치한다.

또한, 확관율이 증가함으로 인해서 튜브와 튜브시트 계면 사이에 잔류압축 Hoop Stress가 커지게 됨으로써 튜브와 튜브시트 사이의 밀착도가 증가하여 계면 사이의 Clearance Gap은 작아지고, 인발하중은 증가하는 것으로 생각된다.

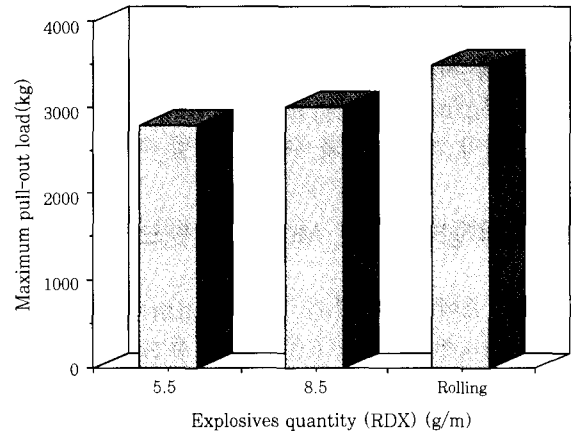


Fig. 12 Pull-out loads of explosive and roller expanding for 5/8" tubes

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

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" 튜브에서는 일반적으로 튜브의 두께가 두꺼워 튜브시트내에 Groove를 형성시키기 때문에 Leak가 발생되지 않는 것으로 알려져 있으며, 5/8" 튜브는 직경이 작고, 두께가 두꺼워 Groove를 형성시키지 않기 때문에 500kg/cm<sup>2</sup> 이상의 높은 압력에서 Leak가 발생하는 것을 알 수 있었다.

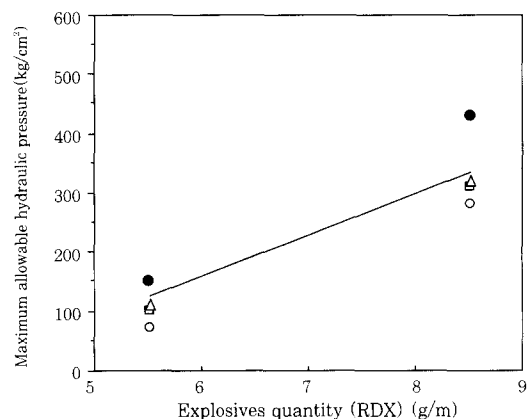


Fig. 13 Results of hydraulic pressure tests of 5/8" tubes

이상의 실험 결과에서 화약량의 증가에 따라 Leak 발생에 대한 내수압 허용 압력이 증가하는 이유는 화약량이 증가함에 따라 튜브의 확관율이 증가하여 튜브와 튜브시트와의 밀착도가 커지기 때문이며, Groove의 존재로 인하여 튜브시트 전면에 걸쳐 균일한 확관이 이루어지기 때문이다.

### 3.5 폭발 확관 후의 미소경도(Micro Vickers Hardness) 변화

Fig.14의 폭발 확관 및 롤 확관 후 길이 110mm 튜브시트 전면에 대한 미소경도 변화를 나타낸 것으로서, 폭발 확관한 튜브에서는 튜브시트 횡단면에 약 170Hv의 미소경도값이 비교적 균일하게 분포하고 있으나, 롤확관한 튜브에서는 측정 위치에 따라서 150~250Hv 가량의 미소경도값의 변화가 나타남을 알 수 있었다. 이와 같은 이유는 인발 시험, 수압 실험 결과에서도 나타난 것과 같이 폭발확관의 경우에는 화약의 폭발에 따른 완충재의 팽창압력이 튜브 전 부분에 균일하게 작용하기 때문에 미소 경도 값의 변화가 적지만, 롤확관의 경우에는 Mandrill에 의해서 확관이

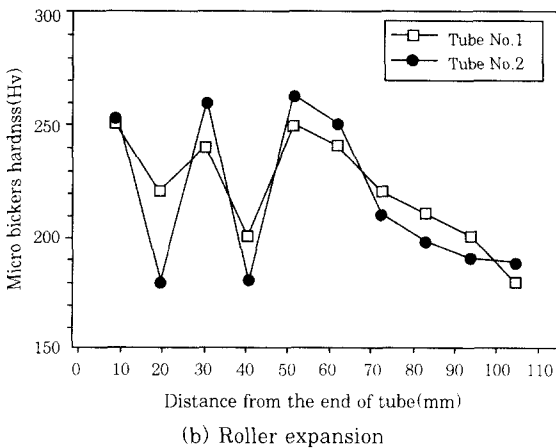
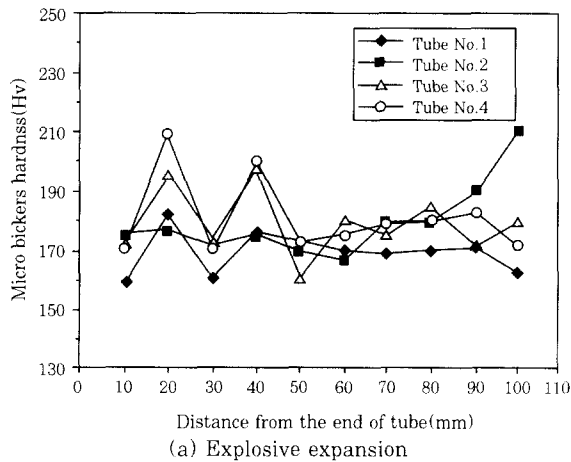


Fig. 14 Variations of the hardness values

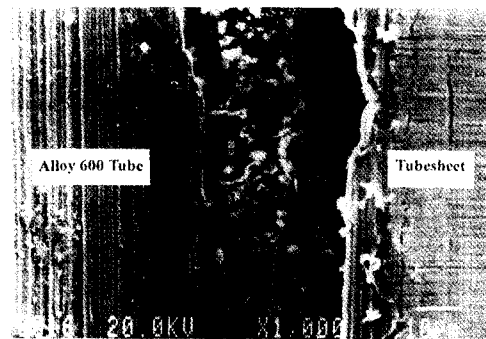
20mm 간격으로 여러 단계에 걸쳐 이루어지므로 각 단계마다 불균일한 확관 압력이 작용되기 때문에, 확관 중첩 부분에서의 응력 집중에 의한 튜브의 가공 경화율이 부분적으로 증가하기 때문이라고 생각된다.

### 3.6 튜브와 튜브시트 접합 계면 분석

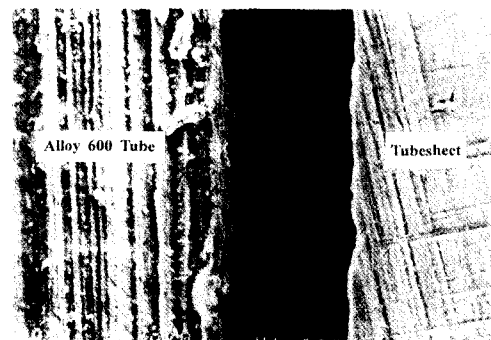
#### 3.6.1 튜브와 튜브시트 접합 계면의 Clearance Gap 측정

Fig.15 과 Fig.16은 3/4" 튜브와 5/8" 튜브에 대한 폭발 확관 및 롤 확관한 후의 튜브시트 홀과 튜브의 접합 계면을 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰한 결과이다. 접합 계면에 약 20~50μm의 Clearance Gap이 나타남을 알 수 있었다. 이와 같이 확관 후 튜브와 튜브시트 계면에서의 Clearance Gap이 나타나는 이유는 폭발 확관의 경우에는 다음과 같은 2가지 이유 때문이라고 생각된다.

첫째는 튜브시트 홀과 튜브 사이에 폭발 확관 전에 잔존하고 있던 공기의 영향 때문이라고 생각된다. 즉, 본 연구에 사용된 RDX 화약의 폭발속도는 약 8,400m/sec로 매우 빠르기 때문에 화약의 폭발에 의한 튜브의 튜브시트내의 접합시 튜브시트 홀과 튜브 사이에 잔존하고 있던 공기가 미처 빠져 나가지 못하고 확관을 방해하는 역할을 하기 때문으로 사료된다.

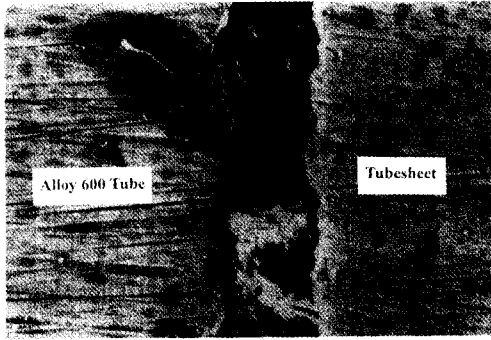


(a) Roller expansion

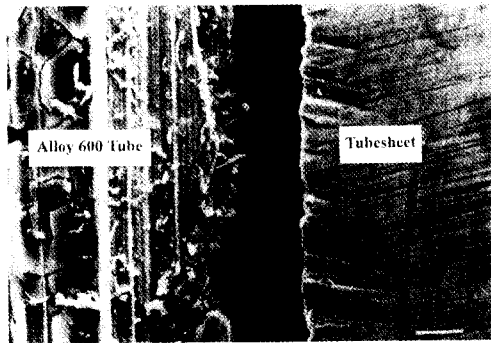


(b) Explosion expansion

Fig. 15 Clearance gaps between Alloy 600 3/4" tube and tubesheet



(a) Roller expansion



(b) Explosion expansion

Fig. 16 Clearance gaps between Alloy 600 5/8" tube and tubesheet

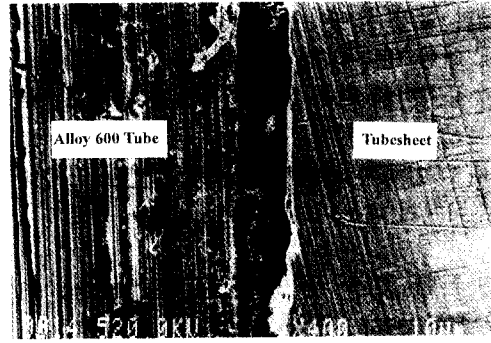
둘째는 튜브와 튜브시트 접합 계면 사이에 존재하는 불순물에 의한 영향으로서, 튜브와 튜브시트 접합 계면 사이에 잔존하는  $Fe_2O_3$  등의 불순물이 확관되는 튜브와 접촉되어 튜브의 확관을 방해하기 때문이라고 사료된다. 특히 롤 확관에서는 이와 같은 불순물의 영향으로 완전한 밀착을 얻기 어려운 것으로 생각된다.

따라서, 위와 같이 확관 후에 접합 계면에서의 Clearance Gap이 클 경우에는 튜브와 튜브시트의 Gap 사이로 부식 산화물 등이 축적되어 확관으로 생성된 튜브내의 잔류 응력 부위에 응력 부식을 촉진시켜 주는 부식환경이 형성될 수 있으므로 Clearance Gap를 최소화 시켜야 할 것이다.

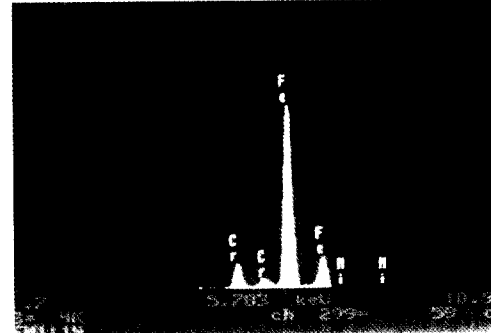
3.6.2 접합 계면 사이의 불순물 영향

Fig.17과 Fig.18은 튜브시트 홀과 튜브와의 접합 강도를 떨어뜨리는 원인 중의 하나로 생각되는 접합 계면 사이의 불순물을 주사식전자현미경(SEM) 및 EPMA를 이용하여 관찰한 결과를 나타내었다.

접합 계면 사이에 존재하는 불순물의 주성분은 Fe-Cr-Ni 및 Fe로 구성되어 있는 것을 알 수 있으며, 특히 Fe-Cr-Ni 화합물 조성은 초 내열합금인 Alloy 600 튜브의 주성분과 잘 일치하고 있다. 이것은 고온, 고압의 순간적인 폭발 충격으로 인하여 튜브의 겉면이

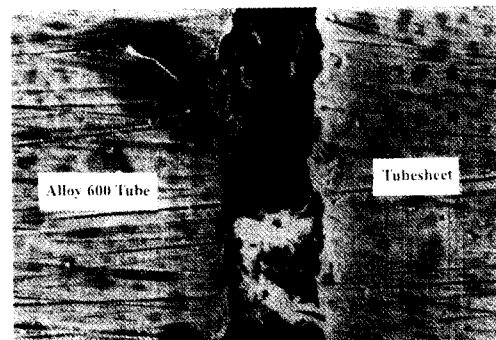


(a) Interface between the tube and tubesheet

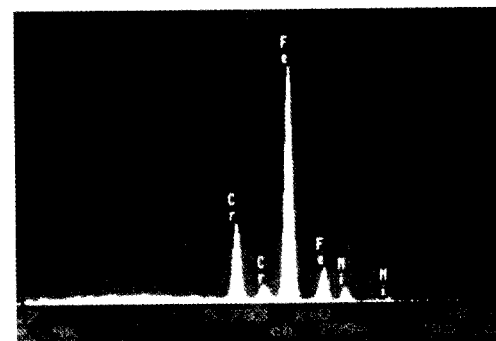


(b) EDS qualitative analysis of the impurities

Fig. 17 Microstructure of impurity be existing between tube and tubesheet for Alloy 600 3/4" tubes



(a) Interface between the tube and tubesheet



(b) EDS qualitative analysis of the impurities

Fig. 18 Microstructure of impurity be existing between tube and tubesheet for Alloy 600 5/8" tubes

소성 변형될 때 Surface Effect로 인해 약한 부분이 떨어져 나온 것으로 추정된다.

그리고, 또한 Fe가 주성분인 화합물은 Mild Steel 인 튜브시트에서 나왔을 가능성이 높는데, 이것은 튜브시트 홀 Cleaning 작업 후 남은 Debris로 추정된다. 따라서 이러한 튜브와 튜브시트 접합 계면에 존재하는 불순물은 튜브와 튜브시트와의 접합강도를 감소시키는 역할을 하기 때문에 튜브시트 홀 및 튜브의 건전성을 유지할 필요가 있다고 사료된다.

### 3.7 Ligament에 미치는 폭발력의 영향

고온, 고압의 화약의 폭발력에 의하여 튜브를 튜브시트에 확관 접합하는 폭발 확관의 경우에는 순간적인 폭발압력에 의해 인접한 튜브시트 홀에 변형이 생길 수 있다고 여러 연구결과에서 보고하고 있다<sup>6,7)</sup>.

따라서, 본 연구에서는 3/4" 및 5/8" 튜브를 사용하여 튜브시트에 폭발확관에 사용된 Mock-up에서 인접 튜브시트 홀 직경의 치수 변형 여부를 조사한 결과 3/4" 튜브 Mock-up에서는 3.5, 5.5g/m을 사용했을 때 튜브시트 홀 치수변화가 거의 20 $\mu$ m 이내이므로 인접 홀에 영향을 미치지 않았다. 반면 5/8" 튜브 Mock-up에서 5.5 g/m을 사용하였을 때에는 치수변화가 거의 20 $\mu$ m 이내이지만 8.5g/m을 사용했을 경우에는 치수변화가 20~50 $\mu$ m이었다.

따라서, 튜브와 튜브시트 홀의 반경차가 50 $\mu$ m 이하이기 때문에 폭발확관에 의한 Ligament의 영향은 없을 것으로 생각되며, 또한 이와 같은 튜브시트 홀 직경의 치수 변화에 대응하기 위해서 확관 전에 튜브를 튜브시트내에 삽입시켜 놓는다면, Ligament에 미치는 영향을 크게 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

### 3.8 Groove에 미치는 화약의 영향

Fig.19는 1.5g/m에서 8.5g/m의 RDX 화약을 사용하여 3/4" 튜브의 튜브시트와의 폭발확관에 사용된 Mock-Up의 튜브시트 홀로부터 튜브시트내 6.4mm 안쪽에 0.4 x 3.2mm 크기의 Groove를 만든 다음 물에 의한 기계적 확관 및 폭발 확관 한 후의 접합 계면을 나타낸 것이다. 그리고 Fig.19의 (d)는 Groove내로의 튜브의 확관을 폭발확관과 비교하기 위하여 Roll에 의한 확관 후 접합 단면을 나타내었다. Table. 1은 폭발확관과 물확관 사이의 Groove부위의 밀착도 등을 서로 비교한 결과를 나타내었다. Fig.19와 Table. 1의 결과에서 알 수 있듯이, 화약량이 증가함에 따라 튜브와 Groove와의 밀착도는 증가하는 경향을 나타내고

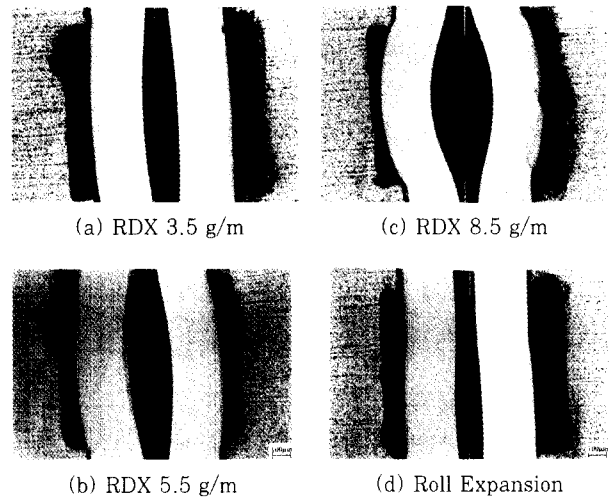


Fig. 19 Interval of groove for Alloy 600 3/4" tubes

Table. 1 Comparison with adherence rate of tube expansion ratio on groove region

Item \ Method	Explosive expansion		Roll expansion (Rate : 3~8%)
	3.5g/m	5.5g/m	
Clearance gap ( $\mu$ m)	60~65	55	50~55
Expansion rate (%)	1.1~2.3	1.0~2.9	3.4~8.6
Groove depth	118/460~440/485	260/500~270/440	370/425~400/455
Groove depth survival	0.41~0.44	0.26~0.27	0.39~0.40

있으며, 특히 물확관에서의 확관율은 폭발확관에 비해 높지만 Groove와의 밀착도는 폭발확관에 비해 우수하지 못하다는 것을 알 수 있었다.

이와 같이 물에 의한 기계적인 확관의 경우가 확관율이 폭발확관에 비해 높은데도 불구하고 확관에 의한 튜브의 Groove내로의 밀착도가 떨어지는 이유는 물확관의 경우에는 물, 즉 Mandrill이 튜브내에서 확관 압력이 증가하더라도 튜브시트 Groove 내로는 튜브를 확관 접합시킬 수 없는 단점을 가지고 있기 때문이다.

그러나, 폭발확관의 경우에는 화약의 순간 폭발력이 튜브의 전 부분에 걸쳐 균일하게 작용하기 때문에 Groove내로 튜브를 깊이 변형시킬 수 있다는 장점을 가지기 때문에 튜브의 Groove와의 밀착도가 증가한다고 생각된다.

### 3.9 잔류응력의 측정 및 해석

3.9.1 튜브와 튜브시트 접합계면에서의 잔류 응력  
 튜브를 튜브시트 홀 내에 삽입하여 폭발확관하면 확



관 과정 중에 튜브자체에 소성변형이 발생한다. 즉, 튜브와 튜브시트 홀과의 유효 간격 만큼 튜브시트의 구속에 의해 튜브에는 잔류응력이 발생된다.

그러므로, 본 연구에서는 튜브와 튜브시트의 확관 과정 중에 튜브에 도입되는 총 잔류응력을 구속응력과 튜브 자체의 순수한 잔류응력으로 정의하고, 3/4" 튜브의 Mock-Up Block에 대하여 폭발 확관과 물 확관 방법별로 튜브에 도입되는 잔류 응력의 상대적인 차이를 조사하였다.

3.9.2 잔류응력의 측정

Fig. 20에 나타난 바와 같이 튜브와 튜브시트 확관 Mock-Up 시험편에서 균일확관 지점과 천이지점에 대하여 확관 방법별로 구속응력과 튜브자체 순수잔류응력을 다음과 같은 단계로 측정하였다.

구속잔류응력의 측정은 Fig. 21과 같이 물, 폭발 확관한 Mock-Up 시험편 각각에 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 응력 정도를 Strain Gauge와 연결된 응력측정시스템을 이용해서

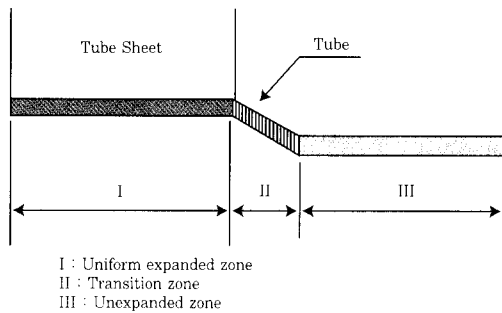


Fig. 20 Scheme of expansion region on tube and tubesheet

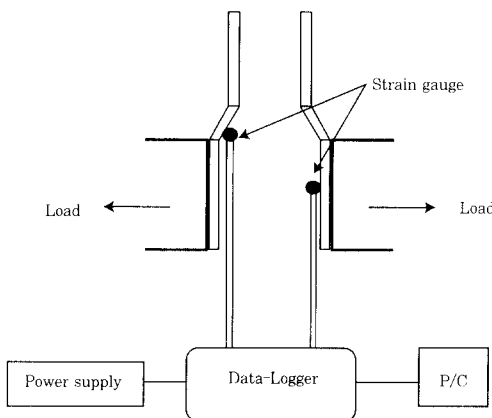


Fig. 21 The outline of measurement on interference residual stress

측정하였다.

그리고, 튜브자체의 순수한 잔류 응력은 튜브 외면의 잔류응력과 튜브 내면의 잔류응력으로 구별하여 측정하였다. 우선, 튜브 외면의 잔류 응력은 구속응력을 측정 한 튜브시트 Mock-Up Block을 제거한 Free Tube 외면을 깨끗하게 세척한 후 튜브 외면의 균일 확관 부분과 천이 지점에서의 순수 튜브외면 잔류응력을 X-Ray를 통해 측정하였다. 이때 Free Tube의 응력 측정 부위는 다음의 Fig. 22와 같다.

튜브내면 잔류응력은 튜브시트 Mock-Up Block을 제거한 Free Tube에 대하여 Fig. 23과 같이 전해연마용 탱크에 전해연마액을 적당한 양만큼 채우고 튜브 내면의 균일 확관 부분과 천이지점에 응력 측정용 Strain Gauge를 부착한 Free Tube를 담근 후 전해연마하였다.

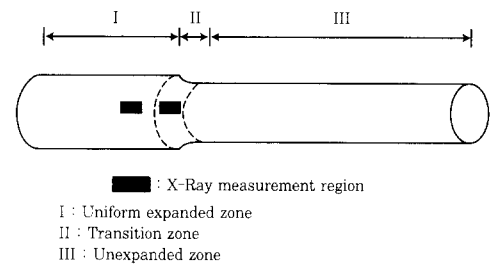


Fig. 22 Measurement of X-ray residual stress on tube outside

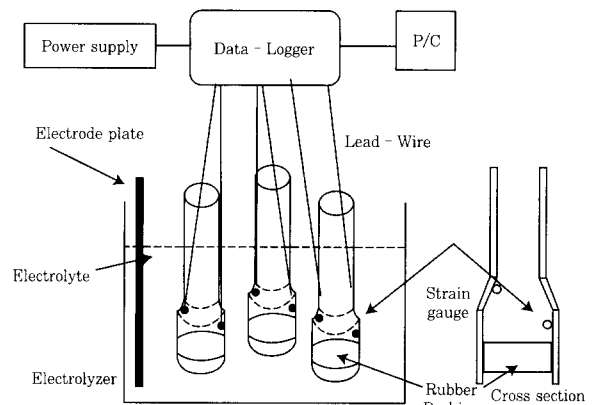


Fig. 23 The outline figure of tube inside residual stress

3.9.3 잔류응력 측정 결과 분석

Table. 2는 튜브시트가 튜브에 가하는 구속응력과 튜브 자체의 순수한 잔류응력을 3/4" 튜브에 대하여 물에 의한 기계적 확관과 RDX 5.5g/m의 화약을 사용하여 폭발 확관된 Mock-Up 시험편에 대하여 튜브 내, 외면의 잔류 응력 측정 결과를 나타낸 것이다.

따라서, 튜브 내면의 인장 잔류 응력의 경우에는 튜

**Table 2** Comparison of residual stress on the inside and outside of the tube with expansion method

(Unit :  $\sigma/YS$ )

Residual stress Specimen		Homogeneous expansion		Transient expansion	
		$\sigma_{\theta\theta}$	$\sigma_{zz}$	$\sigma_{\theta\theta}$	$\sigma_{zz}$
Roll Expansion	Inside	+0.22	+0.35	+0.46	+0.59
	Outside	-0.47	-0.63	-0.39	-0.28
Explosive Expansion	Inside	+0.15	+0.20	+0.37	+0.31
	Outside	-0.59	-0.55	-0.43	-0.36

$\sigma_{\theta\theta}$  : Longitudinal stress     $\sigma_{zz}$  : Horizontal stress  
 YS : 28kg/mm<sup>2</sup> (Tube yield strength)

브 내면 천이 지점에서 롤 확관의 경우는 튜브의 항복 강도가 28kg/mm<sup>2</sup> 인데 비해서 측정된 잔류 응력의 평균값이  $\sigma_{\theta\theta}$  인 축방향 응력은 +0.46,  $\sigma_{zz}$  인 원주 방향 응력이 +0.59 이므로 매우 높은 잔류응력 값을 나타내었다. 또한, 폭발 확관의 경우에는 측정된 잔류 응력의 평균값이  $\sigma_{\theta\theta}$  인 축방향 응력은 +0.37,  $\sigma_{zz}$  인 원주 방향 응력이 +0.31 이므로 롤 확관에 비해서 적은 값을 나타내었다.

즉, 튜브내면에서는 폭발확관이 롤확관의 경우보다 잔류 응력이 낮게 나타났는데, 이와 같은 이유는 폭발 확관은 튜브시트 전 범위에서 균일한 확관 압력이 작용하고, 확관시 부가하중 접촉의 측면에서도 상대적으로 우수하기 때문에 확관 접합 후 튜브에 인가되는 잔류 응력이 적은 것으로 사료된다.

그리고, Table. 2에서 천이 지점과 균일 확관 지점에서의 측정된 튜브 내,외면의 잔류 응력 값을 비교하면, 천이 지점에서 측정된 잔류 응력이 균일 확관 지점에서 측정된 잔류 응력 보다 높게 나타났다.

이상의 결과를 종합하면 물에 의한 기계적인 확관과 화약의 폭발력에 의한 폭발 확관시 튜브에 인가되는 잔류 응력이 폭발 확관의 경우가 상대적으로 물에 의한 기계적인 확관의 경우보다 적으므로 튜브와 튜브시트의 확관 접합계면에서의 내 부식저항성은 폭발 확관의 경우가 높을 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

초내열 합금인 Alloy 600 합금 튜브의 외경이 19.05mm(3/4") 및 15.88mm(5/8")인 튜브의 튜브시트와의 폭발접합에 따른 접합 계면의 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

튜브의 외경이 19.05mm(3/4") 및 15.88mm(5/8")인 Alloy 600 튜브와 튜브시트와의 폭발접합에 적합한 화약은 RDX(Hexogen)이었고, 최적 화약

량은 RDX 3.5g/m~8.5g/m이었다.

그리고, Alloy 600 튜브의 확관율이 증가할수록, 즉 화약량이 증가할수록 내수압강도값은 증가하며, 그 값은 500kg/cm<sup>2</sup> 으로서 평균 100~200kg/cm<sup>2</sup> 정도인 Roll에 의한 기계적인 확관 보다 높다는 것을 알 수 있었다. 또한 접합부의 튜브 내, 외면의 잔류 응력 측정 결과 인장 잔류 응력의 경우, 튜브 내면의 천이 지점에서의 값이 균일 확관 지점 보다 높다는 것을 알 수 있었다.

특히, 폭발 확관의 경우가 물에 의한 기계적인 확관 보다 튜브 내,외면의 잔류 응력이 적게 나타남에 따라 롤확관 보다 폭발확관의 경우가 내 부식 저항성이 증 가될 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

1. 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
2. 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
3. M. D. Chadwick, P. W. Jackson : Explosive welding of tubes and tubeplates, Brit. Weld. J., October(1968), pp.480-492
4. 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, No. 9(1981), pp.33-35
5. W.R.Apblett : Innovations in Joining / Fabrication Techniques, Foster Wheller development Corporation, pp. 120-126
6. 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
7. 思涙忠南, 爆發銲接の接合界面における波形成機構について, メタルと火薬, No.23(1980) pp.33-35