

발전용 열교환기류의 튜브와 튜브시트와의 폭발접합기술
The Explosive Joining Technology of Tube and Tubesheet
in Heat Exchangers on Power Plants

*이병일, 공창식, 심상한
한국중공업(주) 기술연구원, 경남, 창원

1. 서론

화약의 순간 폭발력을 이용한 폭발접합기술은 1900년 말경 화약을 사용하기 시작하면서부터 이용되어 왔던 기술이며, 체계화 되기 시작한 것은 세계 1차 대전 말에 폭탄의 파편이 주변의 다른 금속 제품에 충돌되면서 접합되는 현상을 발견한 시점부터 였다고 할 수 있다.

1944년 Carl이 최초로 폭발접합기술을 학계에 보고한 이후 Philipchuk과 Bois 등에 의해 현상학적으로 이론을 규명하기 시작하였다. 폭발접합기술은 Fig.1과 같이 접합 시키고자 하는 부재(Flyer Plate)와 모재(Base Plate)를 평행 혹은 경사지게 배열한 후, 부재에 화약의 폭발에 따른 초고압의 폭발 압력을 가함으로 부재가 소성변형이 일어나 모재와 충돌하면서 두 재질간의 충돌점에서 금속이 유체(Metal Jet)처럼 거동하는 Jet Wave가 발생하여 화약의 폭발방향에 따라 접합이 되는 고상접합의 일종이다.

따라서, 본 연구에서는 화약을 사용한 폭발접합에 대한 원리 및 응용에 대하여 설명하고, 발전용 열교환기류의 튜브와 튜브시트의 폭발접합(Explosive Joining)에 대하여 접합부의 특성을 평가하고자 한다.

2. 실험 방법

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

본 연구의 가장 기초가 되는 화약은 폭발접합 간의 시간차가 없기 때문에 균일한 접합성을 가질 수 있도록 PETN 도폭선으로 하였으며, 화약량은 약 10 ~ 35 Grain/ft로 결정하였다. 사용된 도폭선 PETN 화약은 약 8,400m/sec로 화약의 폭발속도가 매우 빠르기 때문에 많은 튜브를 연결하여 1회에 작업하여도 튜브의 폭발접합 간의 시간차가 없기 때문에 화약의 품질의 균일성이 유지될 수 있었다.

또한 화약의 폭발력을 제어하여 일정한 압력으로 튜브에 전달하는 매개체로서 균일한 밀도가 요구되는 완충재(Sheath)는 200% 탄성율을 가지는 Polyethylene으로서 재질과 밀도의 균일성에 의해 접합부의 균일성이 확보될 수 있도록 하였다.

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

결은 기존에는 ABB-CE 및 Bab & Wilcox 사의 경우와 같이 화약의 끝단에 Trunkline 를 연결 함으로 불발율이 높았으나, 본 연구에서는 완충재의 형상을 달리하여 화약과 Trunkline 을 직접 연결함으로서 불발이 없어 작업성을 향상시켰다. 최초의 점화의 경우 기존에는 작업기 구보다 상당히 먼 거리인 바닥에서 점화를 함으로서 뇌관의 폭발 파편에 대한 위험성을 내 재하고 있었으나, 본 연구에서는 작업기구에 부착할 수 있는 장비를 개발하여 작업성과 안 전성을 향상시켰다. 폭발접합 후 완충재(Sheath) 제거는 압축가스를 이용하여 제거한 후 완 충재의 잔재를 확인 할 수 있는 보조품을 개발하여 완충재 잔류의 유무를 정확히 확인 할 수 있도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig.3 과 Fig.4 는 접합부 특성 평가를 위해 확관율(Expansion Ratio) 및 수압강도(Leakage Tightness)를 폭발확관법과 기계적인 확관법을 서로 비교한 것으로서 원자력 증기발생기의 경우 확관율의 범위는 2 - 6%로 규정하고 있으나, 폭발접합의 경우 그림에서 처럼 $2.7 \pm 0.5\%$ 로서 균일한 확관율을 얻을 수 있었다.

또한 수압강도의 경우 폭발접합후 튜브와 튜브시트의 접합성을 정확하게 확인하기 위하여 내수압시험(Leakage Test)을 실시하여 Fig.4 와 같이 누수 여부를 조사한 결과 폭발접합 의 경우에는 약 $500\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상까지도 누수가 발생하지 않음을 알 수 있으며, Roll Expander 에 의한 기계확관의 경우에는 약 $100 - 200 \text{kg}/\text{cm}^2$ 정도가 됨을 알 수 있다. 그리고 접합조직(Bonding Structure)을 보면 Tube 와 TubeSheet 의 접합면은 균일하였으며, Tube 와 TubeSheet 의 접합성을 나타낼 수 있는 Clearance gap 은 $10 - 30\mu\text{m}$ 인 것으로 보아 뛰어난 접합성을 가짐을 알 수 있었다.

그리고, 접합부의 응력부식파괴(Stress Corrosion Cracking)는 튜브의 확관면과 비확관면과 의 천이영역에서 잔류응력(Residual Stress)의 존재에 의해 발생되며, 접합면의 불균일성에 의해 Sludge 등의 불순물의 유입으로 파괴를 일으키는 것으로 보고 되고 있다. 폭발접합의 경우에는 천이영역이 완만하여 잔류응력이 거의 없으며, 균일한 접합으로 불순물의 유입을 차단하여 응력부식파괴 저항성이 약 30% 정도 향상되는 것으로 나타났다.

4. 결 론

발전 플랜트용 대형 열교환기류의 튜브와 튜브시트의 기존의 Roll Expander 에 의한 기계 적인 확관법의 문제점을 해결하기 위하여 폭발접합을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었 다.

- 1) 폭발접합기술은 화약을 이용하여 화약의 기폭력에 의해 발생하는 순간 초고압을 완충 재를 이용하여 튜브에 전달하여 튜브를 확관시키는 공정으로 작업성이 매우 우수하며 균일한 접합부를 얻을 수 있었다.
- 2) 폭발확관의 경우 확관율이 $2.7 \pm 0.5\%$ 로서 균일한 확관율을 얻을 수 있었다.
- 3) 접합 후 튜브와 튜브시트의 접합성 여부를 확인할 수 있는 인발강도(Pull-out Strength) 는 평균 850kg 정도로 Roll 에 의한 기계확관과 동일한 강도값을 얻었다.
- 4) 수압시험을 통한 내수압 측정 결과 폭발확관의 경우 약 $500\text{kg}/\text{cm}^2$ 로서, $100 \sim$

200kg/cm² 인 Roll 에 의한 기계확관의 경우보다 튜브와 튜브시트의 기밀성이 2 배 이상 뛰어남을 알 수 있었다.

- 5) 접합부의 미세조직 및 내용력 부식파괴 특성을 조사한 결과 폭발확관은 천이영역이 완만하여 기존 기술에 비해 응력부식파괴 저항성이 약 30% 정도 증가함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- 1) B. Crossland, Mechanism of Explosive Welding and Welding Parameters, Explosive welding (1976), TWI, 2~4
- 2) AWS, Welding Handbook, 8th ed. vol. 2, 761~781
- 3) J. S. Rinehart and J. Pearson : "Explosive Working of Metals" Pergamon Press, 1963
- 4) Patent No. 30, 093, 521, E. I. Dupont de Nemours & Co.LTD., 1962.

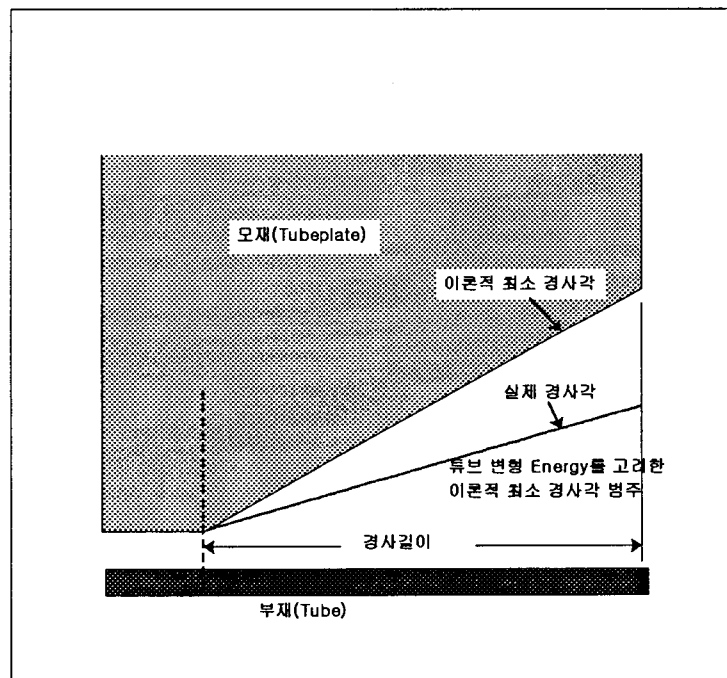


Fig. 1 The Slope Angle Curve of tube and Tubesheet

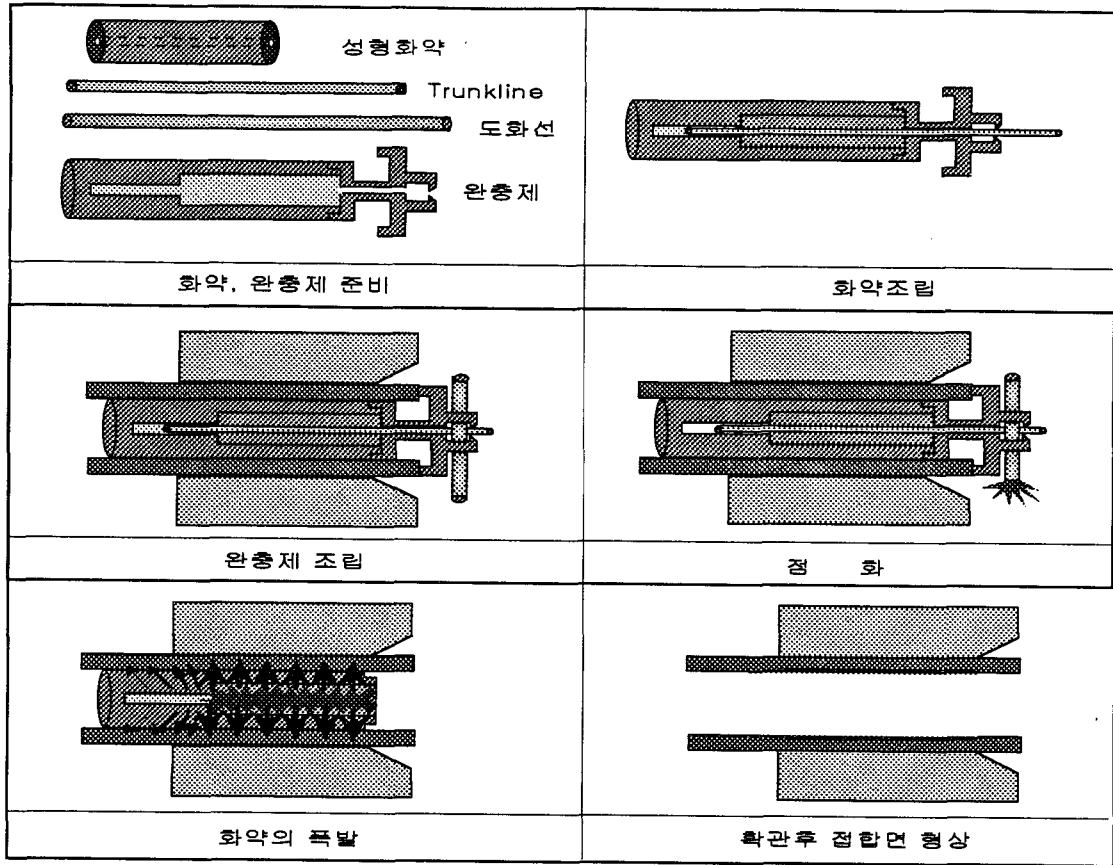


Fig. 2 The Procedure of Explosive Joing Work

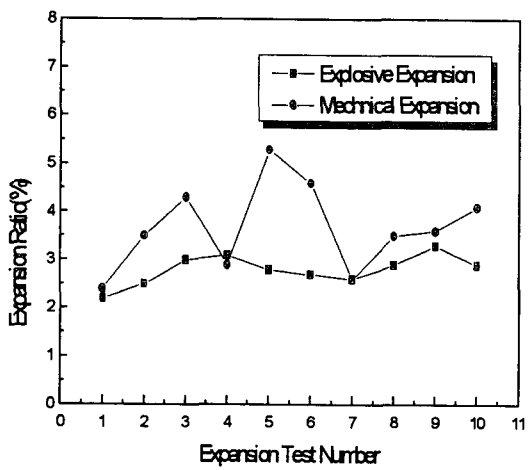


Fig. 3 Tube Expansion Ratio

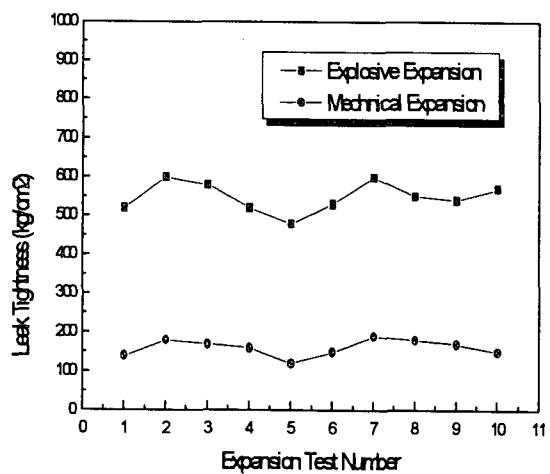


Fig. 4 Hydro Leak Tightness