

特報 : 고상용접의 원리와 응용

폭발용접의 원리와 응용

성 상 철 · 심 상 한 · 이 병 일

The Principle and Application of the Explosive Welding

S. C. Seong, S. H. Shim and B. I. Lee



성상철/부경대학교/
1976년생/TLP, 각종
고상용접, 스테인리
스강의 용접 연구



심상한/한국중공업/
1953년생/폭발용접,
폭발절단, 레이저 용
접에 관한 연구



이병일/한국중공업/
1963년생/폭발용접,
TiAl의 TLP에 관한
연구

1. 서 론

폭발용접은 화약의 폭발에 의한 충격 에너지를 이용하여 금속을 접합시키는 방법으로서 화약의 폭발에 의해 생기는 순간적인 높은 에너지를 이용하는 접합법이다.

1944년에 처음으로 폭발용접이 관심을 끌기 시작한 이래 현재에는 폭발용접의 기술적, 상업적인 이점으로 인해 수요가 증가하고 있는 실정이다. 적용 예는 거대한 판재의 cladding을 포함하여 cladding nozzle, tube와 tubeplate의 접합, pipe와 pipe의 접합등에 사용되고 있다. 종래의 용접법으로는 용접이 곤란하거나 불가능한 것으로 생각되었던 이종금속에 대해서도 적용이 가능하고, 용접에 의한 열영향을 받지 않으며 용접 속도가 대단히 빠르다는 잇점이 있다. 또한 용접의 차이가 커서 접합이 곤란한 금속을 폭발용접하면 이음부는 충분한 강도를 가지면서 용이하게 접합할 수 있는 것이 큰 특징이다.

대부분의 금속은 폭발용접이 가능하지만 폭발의

충격에 의해서 균열이 발생되기 쉽고 주철과 같이 취약한 금속 및 Mg을 함유한 알루미늄 합금(순 알루미늄과는 접합 가능함)등은 이 용접법을 사용하기는 곤란하다.

시공상의 특징으로는 특별한 기계 장치가 필요하지 않고 모재가 판재 혹은 파이프상이면 모재 두께에 제한 받지 않고, 어떠한 형태와도 가능하기 때문에 다품종, 소량생산이 가능하다. 한편 접합시에 화약을 사용하기 때문에 취급에 있어서 주의할 요하고 큰 폭발음 때문에 용접장소의 제한을 받는다는 것이다.

2. 원리와 기구

2.1 예비처리

접합부의 표면처리는 중요하다. 왜냐하면 산화피막과 같은 오염물질이 이음부에 존재하면 접합을 방해할 뿐 아니라 이음부의 물성이 저하된다. 일반적으로 폭발용접을 하기 전에 이음부는 연마

지로 연마한 후 탈지하여야 하며 연속적이고 건전한 접합부를 얻기 위해서는 $150\mu\text{m}$ 정도의 표면 거칠기로 가공하여야 한다.

2.2 원 리

폭발용접시의 소재의 기본적인 배열방법을 Fig. 1에 나타내었다. 또한 Fig. 2는 폭발용접시에 발생하는 폭발현상을 나타내었다. 모재와 용접하고자 하는 상대재를 적당한 간격으로 평행하게 배치한다. 이 상대재의 위에 완충제를 넣고 적당한 양의 폭약을 배열한 후 그 일단을 뇌관에 의해서 기폭시키면 폭발이 생기고 이 폭발력에 의해서 상대재는 특정한 각도($5\sim 30^\circ$ 정도)로 모재와 충돌한다.

충돌점에서는 양방의 금속이 매우 큰 변형속도

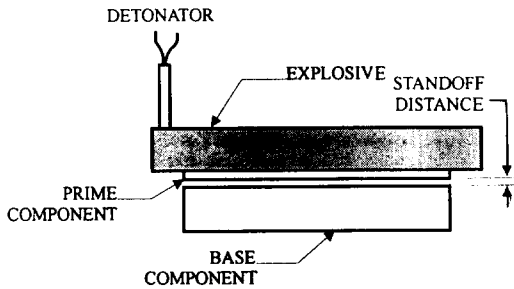


Fig. 1 Typical Component Arrangement for Explosion Welding

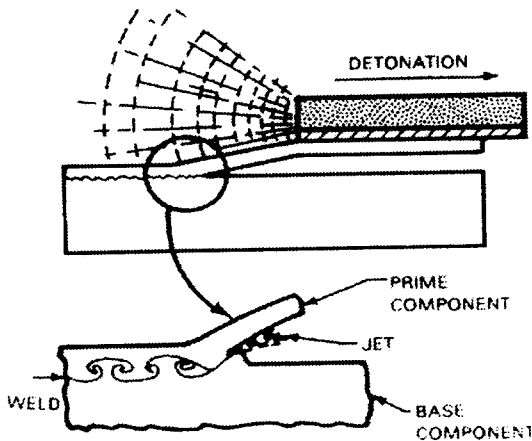


Fig. 2 Action between Components during Explosion Welding

($\sim 102/\text{s}$)와 고압에 의해서 금속표면의 산화피막과 흡착된 가스가 제거된다. 이와 같이 생성된 청정한 표면은 고압에 의해서 밀착하고, 모재와 상대재는 완전하게 야금학적으로 결합된다.

폭발용접의 접합계면에는 특유의 물결모양(Fig. 3)이 관찰되며 파의 크기는 붕괴 조건에 따라서 다르고 파의 파장은 충돌각도가 크게 되면 길어지게 되지만 어떤 충돌 각도 이상으로 되면 물결모양은 소실하고, 직선상의 계면으로 변한다.

Fig. 5는 폭발용접할 경우의 순서도를 나타낸 것이다.

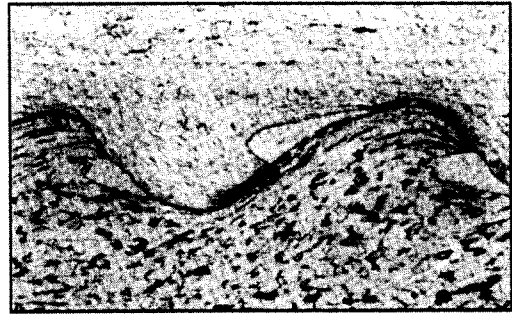


Fig. 3 Typical Wavy Interface Formed between Two Explosion Welded Components (Stainless Steel to Mild Steel)

3. 폭발용접의 기구와 그 인자

3.1 용접 기구

Fig. 4(a)는 폭약이 폭발되기 전의 가장 일반적이고 기본적인 배치를 나타내고 있다. Fig. 4b는 폭발 진행중의 상태를 나타내고 있는 데 여기서 화약의 폭발점은 V_0 의 속도로 이동해서 B에 도달하며, 접합(Collision point)은 S에 도달한다.

Flyer plate의 속도 V_p 는 화약의 하중 및 화약의 종류에 의존한다.

V_p 의 정확한 값은 아직 계산되지 않았으며 이것을 계산하기 위해서는 몇가지의 가정이 필요하다. 즉 Fig. 4(b)와 같이 $AS + SB \setminus AB$ 인 위치에서 약간 늘어나게 되고 연신된 후 $SB = SB'$ 로 된다고 가정한다. 폭발용접은 collision velocity, collision angle,

prime component velocity에 따라 영향을 많이 받는다.

위의 가정으로부터 아래와 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{V_p}{\sin(\beta - \alpha)} = \frac{V_D}{\cos \frac{\beta}{2}}$$

여기서 주어진 값 V_p , V_D , α 로부터 β 의 값을 구할 수 있다.

B점에서의 압력은 대단히 높으나 재료의 전단강도는 비교적 작다. 결과적으로 B점에서 금속은 낮은 점성의 유체와 같은 거동을 한다. Fig. 4(b)로부터 S, VF와 연관된 Flyer-plate의 속도는 아래와 같이 나타낼 수가 있다.

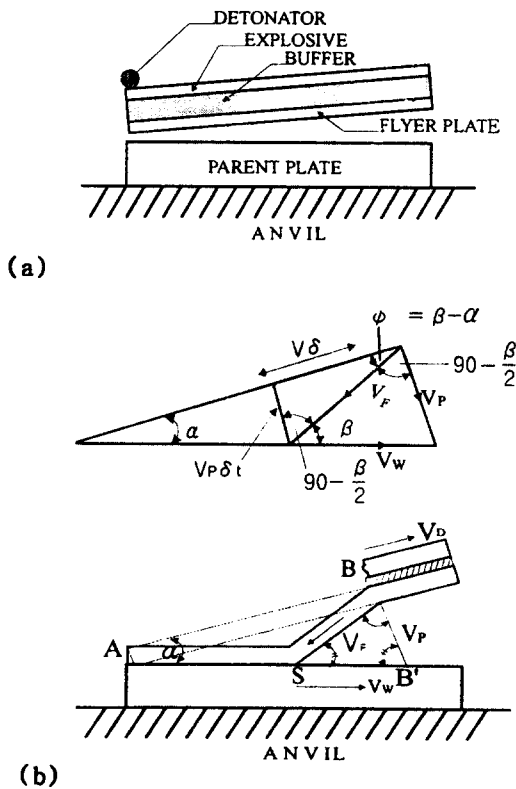


Fig. 4 Inclined Arrangement for Explosive Welding

$$V_f = V_w = \frac{V_p/2}{\sin \frac{\beta}{2}}$$

여기서 V_w 는 용접속도이다.

에너지 보존법칙에 의해서 Fig. 6(b)에 나타나는 것과 같은 Flyer-plate Salient와 Re-entrant jet가 나타난다. 따라서 아래의 관계식이 만족된다.

$$m_s = \frac{m}{2}(1 + \cos \beta), m_r = \frac{m}{2}(1 - \cos \beta)$$

여기서 m 은 Flyer-plate의 중량이고 m_r 은 re-entrant jet의 중량이며 m_s 는 salient jet의 중량이다.

실제로는 Fig. 7과 같이 S점에서 Flyer plate와

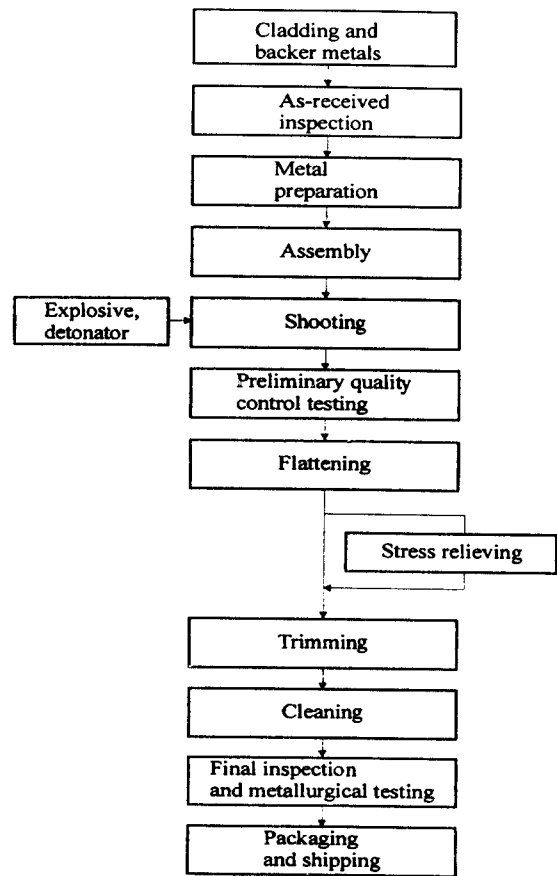


Fig. 5 Explosion Welding Process Flow Sheet

parent plate의 접합부에서는 높은압력이 존재하게 된다. 이 때 발생하는 Jet는 모재와 상대재 (flyer)의 표면의 산화피막을 함유하고 만약 산화피막과 같이 해로운 물질이 완전히 제거된다면 높은 압력 하에서 새로운 면이 생성되고 건전한 용접이 이루어 질 것이다.

더욱 더 단순한 가정은 유동이 음속보다 느리게 일어난다고 생각하는 것이다. 만약 유동이 음속보다 빠르다고 하면, 즉 V_F 혹은 V_W 가 각각 상대재 (flyer)와 모재부에서 음속을 초과하면 위의 문제를 해결하기는 어려울 것이다. 그러나 jetting은 음속 이상의 속도에서 발생할 수 있지만 실험 결과에 의하면 이 경우 건전한 접합이 이루어지지 않는다.

Fig. 8과 같이 평행 배치하여 폭발용접하려고 하면 아래와 같은 조건이 만족되어야 한다.

$$V_F = V_W = V_D$$

또한 위의 식을 만족하기 위해서는 아래와 같은 식이 성립하여야 한다.

$$\frac{V_W}{V_{SP}}, \frac{V_F}{V_{SF}} < 1$$

즉 V_D 가 V_{SP} , V_{SF} 보다 같거나 작아야 한다. 만약 두꺼운 flyer plate가 사용된다면, 상부 운동에너지 이하로 하기 위해서 낮은 V_P 를 가져야 하고 이 때 V_P 는 fluid-like를 만들 수 있는 최소값보다 커야만 한다. 만약 V_P 가 작다면 β (NB: $\beta = V_P/V_D$)의 최소값을 얻기 위해서는 V_D 의 값이 작아야 한다.

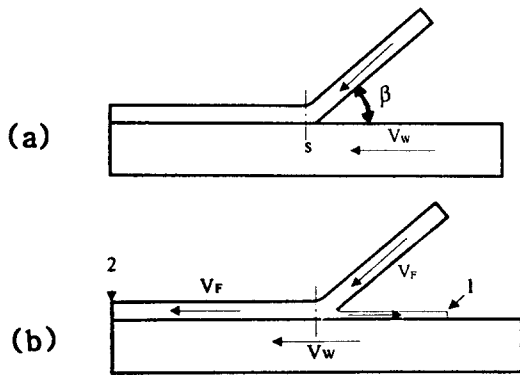


Fig. 6 Formation of Re-entrant Jet 1-Re-entrant Jet, 2-Salient

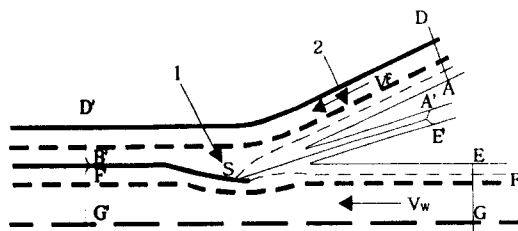


Fig. 7 Formation of Re-entrant Jet from Surfaces of both Flyer and Parent Plates. 1 -Isobars; 2-Stream Lines

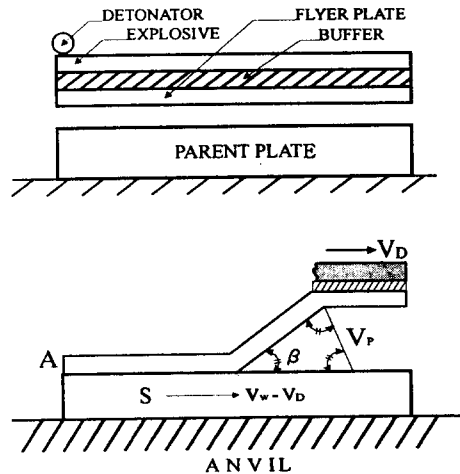


Fig. 8 Parallel Arrangement for Explosive Welding

3.2 용접인자

폭발용접시의 적정 용접조건을 설정하기 위해서

많은 연구가 행해졌고 이 인자는 'explosion welding window'에 종합적으로 집약되어 있고, 건전한 용접부가 얻어지는 용접조건을 규정하고 있지만 그렇게 만족스럽지는 못하다.

비록 폭발용접 인자가 완전하게 정의되지는 않았지만 그럼에도 불구하고 현재 가장 기본적인 인자는 아래와 같다.

(a) 용접 속도는 음속 이하이어야 하며 아래의 식을 만족해야 한다.

$$\frac{V_w}{V_{SP}} = \frac{V_F}{V_{SF}} < 1$$

여기서 V_{SP} 와 V_{SF} 는 각각 모재 및 상대재에서의 음속이다.

(b) 동적 경사각 β 는 표면의 상태와 재료의 물성에 따라 다르지만 상부 혹은 하부 경계 사이의 값을 가져야 하며, 일반적으로 β 의 값은 5~25° 정도이다. 이 값 이외에는 V_p 가 어떤 값을 가진다고 해도 용접은 되지 않는다.

무게 감소의 data로부터 re-entrant의 최대 크기는 5° < β < 25°에서 발생하고 최대 무게 감소는 용접의 최적 조건을 뜻한다. 그 이유는 최대 청정 작용이 발생하기 때문이다.

(c) 최소값의 V_p 로 만족스러운 용접을 할 수 있는 경우가 최적의 상태이며 이것은 유체와 유사한 거동을 일으키는 데 필요한 어떤 한계 접촉 압력과 관련이 있다.

(d) 용접이 가능한 V_p 의 최소값 외에 운동에너지의 최소값이 존재한다. 이것은 표면의 청정화에 기여하는 jet의 최소 두께와 간접적으로 관련되어 있다. 최대 운동에너지 이상에서는 용접이 되지 않는 경우가 있다. 왜냐하면 과도한 용융과 그 결과로서 계면에 취약한 금속간 화합물이 형성되기 때문이다. 이상적인 조건하에서 폭발용접하면 경계면에서 어떤 용융도 없으며 고상상태에서 용접된다.

(e) Flyer plate와 parent plate는 평형한 상태로 배치된 경우 그 사이의 간격이 flyer plate 두께의 반 이상일 경우 상대적으로 폭발 속도가 빠른 Trimonite (V_p 가 3000~4000m/sec)를 사용한다.

4. 폭 약

폭약의 폭발에 의해 발생된 압력(P)은 밀도(ρ)와 폭발 속도의 제곱(V_D^2)에 직접적으로 비례한다.

$$P=1/4\rho V_D^2$$

폭발속도는 화약의 양이나 화약의 종류에 따라 크게 다르며 폭발용접에 주로 사용되는 화약의 종류는 다음과 같다.

고속 폭약 (High velocity : 14750 to 25000 ft/s)

- Trinitrotoluene (TNT)
- Cyclotrimethylenetrinitramine (RDX)
- Pentaerythritol tetranitrate (PETN)
- Composition B
- Composition C4
- Plasticized PETN-based rolled sheet and extruded cord

● Primacord

중저속 폭약 (Low to medium velocity : 4900 to 14750 ft/s)

- Ammonium nitrate
- Ammonium nitrate prills (pellets) sensitized whih fuel oil
- Ammonium perchlorate
- Amatol
- Amatol and sodatol diluted with rock salt to 30 to 35 %
- Dynamites
- Nitroguanidine
- Diluted PETN

아래의 두 화약은 이미산업현장에서 사용되고 있으며 cladding에 적합하다.

(a) Nobel s explosives company limited에서 만든 Trimonite 1은 ammonium nitrate, TNT이며 이것들은 분쇄된 Al 혼합물로 되어 있고 V_D 는 화약 분말 입자의 두께에 의존한다. 폭발속도는 2~3.8Km/sec정도이다.

(b) Ammonium nitrate/diesel oil mixture는 6~12% diesel oil을 함유하고 있으며 사용하기에 편리하며 안전한 화약이다. V_D 는 화약 분말의 두께에

의존한다. 폭발속도는 $1.5 \times 2.3 \text{ km/sec}$ 정도이다.

5. 클래딩의 기술적인 문제의 해결방법

폭발용접을 이용한 클래딩의 잇점은 롤 클래드보다 더 큰 판재를 클래딩할 수 있으며 또한 롤 클래드로는 접합하기 곤란한 재료의 클래딩도 쉽게 할 수 있는 잇점이 있고 사용하는 화약에 따라서 클래드 재료의 두께를 조절할 수 있다.

폭발용접은 지금까지 큰 판재나 다른 방법으로는 용접이 곤란한 재료에 상업적으로 이용되고 있는 실정이다. 상업적으로 이용되는 판재는 대개 metal/MS, brass/MS, stainless steel/MS, Monel metal/MS, Ti/MS 등이다. 여기서 MS는 연강을 의미한다. 그러나 이들 외에 다른 재료의 접합도 가능하지만 상업적으로 수요가 적기 때문에 아직은 적용례가 적은 실정이다. 그 대표적인 예는 lead/MS, 고장력강/MS, 마르에이징 강/MS, 마르에이징강/steel 외장판별, 알루미늄외장/알루미늄, Al/MS/고장력강 등이다.

Ti 클래드 강의 가공성을 높이기 위해 열처리조건과 전단강도의 관계를 조사한 결과에 따르면 600°C 이하에서 열처리하는 것이 바람직하고 700°C 이상으로 가열하면 접합계면에 취약한 화합물이 생성되고 전단강도가 크게 저하되기 때문에 이 온도에서 열처리하는 것은 피해야 한다.

하스텔로이 클래드강을 폭발 압접 후 연화를 위해 열처리하면 모재로부터의 탄소의 확산에 의해 하스텔로이 측에 탄화물이 생성되고 경도가 높아지고, 급힘 가공하면 균열이 발생한다. 이 같은 경우, 그 사이에 304 스테인리스강을 넣어 3층 클래드로 하면 열처리가 가능하다.

한편 폭발 용접재를 고온에서 사용하면 접합부에 취약한 화합물이 생성되어 강도가 저하되는 경우도 있다. 이 같은 경우에도 다른 금속을 삽입한 3층재로 하면 이러한 현상을 피할 수 있다. 그 예로서 Al/강클래드 및 Al/Ti강의 3층 클래드의 가열조건과 접합강도의 관계를 조사한 결과 Ti를 삽입한 클래드가 좋은 물성을 나타내었다.

6. 폭발용접부의 여러 가지 성질

6.1 용접부의 품질

폭발용접부의 품질은 계면의 상태에 따라서 다르고, 물성은 주로 강도, 인성, 연성으로 평가된다. 폭발용접부의 물성은 용접부와 모재의 인장, 충격, 굽힘, 피로특성 등을 비교함으로써 알 수 있다.

폭발용접으로 고 연성과 고 강도의 야금학적인 이음부를 만들 수 있으며 clad plate는 ASTM A263, 264, 265의 명세서에 규정된 값을 만족해야 한다.

전단시험의 대안으로서 이음부의 연속성을 조사하기 위해 삼점굽힘 시험이 사용되며, ram 인장시험은 전단시험을 할 경우 시험편의 부정확한 기계 가공과 테스트 기계 받침대의 부정확한 배치 등으로 인한 문제점이 없다는 잇점이 있기 때문에 이 시험법이 주로 사용되고 있다.

알루미늄을 시험하는 경우 chisel test가 사용되며 드롭해머 인장 시험도 적용 가능하다. 극저온용 재료에서 가스나 액체의 표면 유출속도는 sliver interlayer에서 $1 \times 10^{-7} \text{ atmcc/sec}$ 보다 더 낮은 양으로 유출되어야 한다.

6.2 비파괴 검사

폭발용접의 비파괴 검사에는 주로 초음파 검사가 채용되고 있다. 방사선 검사는 두 재료의 밀도 차이가 아주 다른 경우에 사용된다.

초음파 탐상시험은 폭발용접부에 널리 적용되고 있지만 이것만으로 용접부의 강도를 결정하기는 곤란하다. 그러나 용접부의 건전성을 판단하는 것은 가능하다. Pulse-echo 기법이 압력용기의 클래드 강에 사용되며 이 때 주로 사용되는 초음파의 주파수는 $2.5 \sim 10 \text{ MHz}$ 이다.

6.3 파괴검사

파괴검사는 용접부의 강도를 조사하기 위해 사용된다. 표준시험 기법이 사용되거나 특별하게 고안된

시험이 이음부의 강도를 측정하기 위해 사용된다.

구리, 스테인리스강, Ni합금의 탄소강판 클래드의 검사 방법은 ANSI/ASTM에 명시되어 있다. 강도의 측정에는 주로 전단, 굽힘시험이 이용되고 있다.

Chisel test는 폭발용접부의 품질을 평가하기 위해 널리 사용되고 있으며, 용접의 품질이 불량한 경우 파괴는 chisel점의 앞 계면을 따라 발생한다.

인장-전단시험 (Tension-Shear Test)은 용접부의 전단강도를 평가하기 위해서 실시한다. 이 시험편의 형상을 Fig. 9에 나타내었다. 이 그림에서 전단부의 길이 D는 굽힘이 발생되지 않도록 설계하여야 한다. 파괴는 전단에 의하며 용접부에 평형하게 발생한다. 만일 모재부에서 파괴되면 용접부의 전단강도는 모재의 강도보다 높다는 것을 알 수 있다.

폭발용접부의 인장강도는 특수한 ram인장 시험

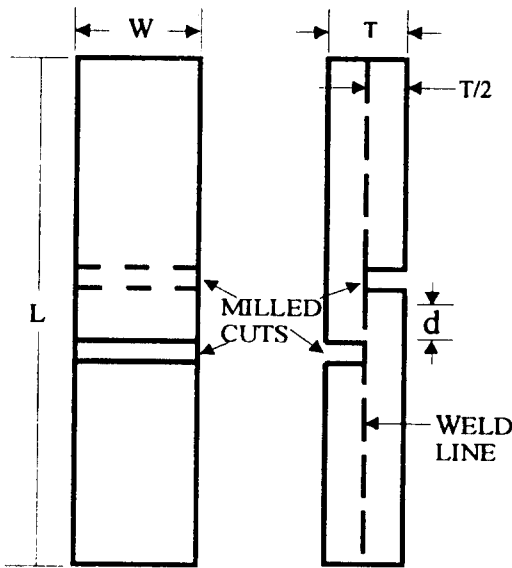


Fig. 9 Tension Test

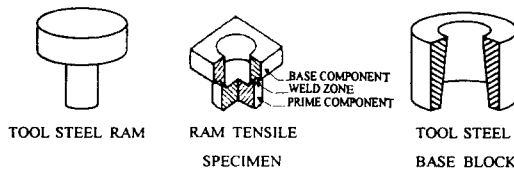


Fig. 10 Machined explosion-clad test sample and fixture for ram tensile testing of bond zone

에 의해서 구해진다. Fig. 10에 이 시험법의 모식도를 나타내고 있다. 시험은 ram 구멍 속에 시험편을 끼우고 그 위에 다시 base block을 끼워서 시험한다. 압축하중은 base block과 ram을 통하여 주어지며 파괴 시의 하중을 기록한다. 이 시험법으로 접합계면의 최대 인장강도와 상대적인 연성값을 구할 수 있다.

7. 폭발용접 클래드의 응용례

7.1 Cladding 가능한 금속

- Aluminum
- Aluminum bronze CA 106
- Austenitic stainless steels (and some ferritic) brasses
- Copper OF, DHP, DLP
- Cupro nickel 90/10, 70/30
- Hastelloy alloys B, B2, C, C-276, C-4, and G
- Incoloy alloys 800, 825
- Inconel alloys 600, 625
- Monel 400, 404, K-500
- Nickel, Grade 200, 201
- Nickel silver
- Platinum
- Silicon bronze everdur-1015
- High silicon 655
- IMI titanium 115, 261

클래드 판재는 vessel fabrication, 열교환기, tube plate, 전기적, 구조적 용도를 위한 천이 이음부 (transition joint)의 제조에 널리 이용되고 있다.

7.2 Backing Metals

모든 보일러용 강, 오스테나이트, 페라이트 스테인리스 강, 비철계 합금, 단조용강

7.3 Shell Plate

두께 2~6mm의 다양한 클래드 재로서 20~

50mm의 복합재료에 사용한다. 대개 더 값비싼 cladding재료는 경제적인 이유로 shell plate 형태로 요구된다. 예를 들면 Ta, Hastelloy와 같은 금속 등이다.

고가의 cladding 재료의 최대 shell plate 크기는 아래와 같이 다양하다.

- Tantalum 3000x1170mm
- Hastelloy 3550x1120mm
- Titanium, Inconel 6000x2000mm nominal
- Incoloy Monel 6000x2000 nominal

Shell plate는 오스테나이트 스테인리스강, 구리 합금으로 clad할 수 있다.

7.4 Tube plates

전 범위의 클래딩 재료가 열교환기에 사용되고 보통 50~300mm backing재와 6~10mm로 가공된 두께의 클래딩 재료가 사용된다. 최대 3000mm 직경까지는 대부분의 cladding 금속이 사용될 수 있으며 T1에서는 최대 직경은 2800mm이다.

7.5 이종재

이것은 구조용, 전기용, 극 저온용의 용도로 사용할 수 있다 (Table 1).

폭발용접법은 이종 금속 판 및 이종 금속의 파이프를 전면에 걸쳐서 금속조직적으로 접합시킬 수 있기 때문에 이 방법에 의해서 클래드 동과 비철 클래드가 공업적으로 제조되고, 이렇게 생산된 제품은 중화학 산업분야와 압력용기 분야 등 다방면에 걸쳐서 사용되고 있다.

클래드강의 합재로서는 스테인리스강 외에 T1과 네이발 황동, 암스황동 등의 동합금, 모넬, 하스텔로이, 인코넬 등의 니켈합금, 지르코늄, 탄탈륨이 있다. 이것들의 대부분은 내식용이고 폭발용접 후 압연된 박판 클래드로서 이용되는 것도 있다.

Fig. 11에서 알 수 있는 바와 같이 클래드 강 of 접합계면에서 가장 높은 경도치가 보이고 있는데 이것은 폭발압접시 접합계면이 강한 소성변형을 받기 때문에 일반적으로 경도가 높게 나타난다. 이 같은 경화에 의해서 계면에서 연신률의 저하가 현저하지

만 열처리에 의해서 회복시킬 수 있다. 그러나 오스테나이트계 스테인리스강-연강 접합재에서는 오스테나이트계 스테인리스강측에서 인장응력이 발생할 우려와 접합계면에서 모재측으로 탄소의 이동이 생기고 탈탄층과 침탄층이 형성되기 쉽기 때문에 열처리를 할 때는 충분한 주의가 필요하다.

폭발용접에 의해서 제조된 주요한 제품에는 화학 공장의 반응기 등에 사용되는 클래드 강과 용융 용접등에 의해서 용접이 곤란한 이종 금속 이음부 (transition joint : TJ)가 있다.

Fig. 12는 상업적으로 이용되는 중요한 금속과

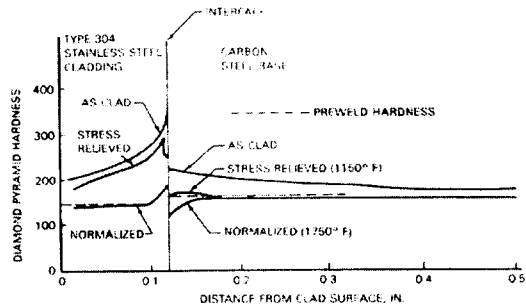


Fig. 11 Hardness Profile Across Stainless Steel to Carbon Clad Plate, As-Welded and After Heat Treatment

| | ZIRCONIUM | MAGNESIUM | COBALT ALLOYS | PLATINUM | GOLD | SILVER | COLUMBIUM | TANTALUM | TITANIUM | NICKEL ALLOYS | COPPER ALLOYS | ALUMINUM ALLOYS | STAINLESS STEEL | ALLOY STEELS | CARBON STEEL |
|------------------|-----------|-----------|---------------|----------|------|--------|-----------|----------|----------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------|--------------|
| CARBON STEELS | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| ALLOY STEELS | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| STAINLESS STEELS | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| ALUMINUM ALLOYS | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| COPPER ALLOYS | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| NICKEL ALLOYS | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| TITANIUM | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| TANTALUM | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| COLUMBIUM | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| SILVER | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| GOLD | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| PLATINUM | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| COBALT ALLOYS | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| MAGNESIUM | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| ZIRCONIUM | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |

Fig. 12 Commercially Significant Metals and Alloys that can be Joined by Explosion Welding

합금의 폭발용접이 가능한 예를 나타내고 있다.

TJ로서는 알루미늄과 다른 금속을 접합한 것이 많다. Table 2는 그 접합례와 적용분야를 나타내고 있다.

용도에 따라서 전기용 (ETJ), 구조용 (STJ) 및 극저온용 (CTJ)로 대별되며 선박용 STJ의 경우 알루미늄과 강을 접합할 때 그 사이에 Ti 박판을 끼워서 폭발용접한다. 알루미늄과 강을 직접 접합시키면 계면부식 등의 문제가 발생하지만 그 사이에 Ti를 삽입한 클래드를 사용하므로써 내식성을 향상시킬수 있다.

Al합금/Al/Ti/Ni/스테인리스강의 5층클래드에 의해서 제조된 알루미늄과 스테인리스강의 관이음은 액체 질소, LNG, Ar, He등의 극저온 액체의

TableF 2. The types, applications of Al transition joint (TJ)

| Types | | Applications |
|----------|-----------------------------------|--------------------|
| Al/Steel | Al Alloy/AlSteel | Ship (STJ) |
| | Al Alloy/Ti/Steel | Ship (STJ) |
| | Al/Steel | Al Electrical TJ |
| | Al/Steel (Pipe) | Cold-Storage |
| Al/Cu | Al/Cu | Electric Conductor |
| | Al/Cu (Pipe) | Cold-Storage (CTJ) |
| Al/SUS | Al Alloy/Al/Ti/Ni/Stainless Steel | Cryogenic (CTJ) |

Table 1. The types, applications of Al transition joint (TJ)

| Type of joint | Sixes | Maximum allowable temperature, °C | | Guaranteed minimum sheer, kgf/mm ² |
|------------------------------------|--|-----------------------------------|------------|---|
| | | At fabrication | In service | |
| Electrical Al/steel | Supplied cut to customer's requirements, the composite makeup | 315 | 260 | 5.6 |
| Al/Ti/Steel | aluminium bonded to 25-35 mm of low carbon steel with an interlayer of 2mm titanium in the latter | 480 | 425 | 5.6 |
| Cu/Al | Supplied with 3~6mm thick OF or deoxidised copper bonded to 10~25mm pure aluminium, again cut to customer's | 260 | 150 | 5.6 |
| Structural Al alloy/Al/steel | Supplied for structural applications, the composite makeup being 6mm alloy on 9mm pure aluminium on 18mm low carbon-manganese steel | 315 | 260 | 5.6 |
| Cryogenic Al/Ag/stainless steel | Normally supplied in composite plate form for customer to machine to required sizes. Composite makeup 48 mm Al alloy bonded to 50mm stainless steel with an interlayer of 0.75mm pure silver | 260 | -196 (min) | 28.0 (tensile at -196 °C) |

수조와 배관등에 사용하면 다른 재료에 비해 우수한 접합강도와 충격강도를 나타낸다.

폭발용접에 의해 접합할 수 있는 금속 접합은 매우 많은 종류에 이르고, 또 3층 이상의 다층 클래드도 용이하게 제조할 수 있기 때문에 용도 개발에 따라 그 응용 범위는 더욱 더 넓어질 것이다.

7.6 폭발용접한 클래드 노즐

이 경우는 lining이 부적합한 곳에 사용하고 있는 실정이다.

폭발 클래딩의 신뢰성 향상에 따라 폭발 클래드 판의 사용은 세계 전역에 걸쳐서 현저히 증가하고 있다. 이 재료를 사용할 때의 중요한 잇점은 아래와 같다.

1. 비싼 금속의 경제적 이용
2. 보다 더 자유로운 plant design
3. 고 강도의 야금학적 접합
4. 이음 경계부에서의 회석 발생 방지
5. 타 용접법으로 곤란한 금속의 용접이 가능
6. 활성적인 금속을 포함해서 재료 선택의 폭이 넓음
7. clad, backing의 두께 다양하게 조절 가능
8. 다른 cladding 재료를 backing의 양쪽면에 사용 가능
9. plate의 이용가능한 크기 범위 증가
10. 소량의 Plate을 경제적으로 이용 가능

이러한 잇점으로부터 폭발 clad 제품은 중화학, 석유 화학 산업에서 경제적이고 신뢰성이 높은 압력용기의 제조가 가능하고 강도와 부식저항이 요구되는 산업에 폭 넓게 이용되고 있으며 열교환기, 굴뚝, 각종 column, 직경이 큰 파이프와 같은 반응성이 높은 용기에서 10년 이상 현장에서 사용하고 있다.

전기적 이종금속 이음부는 알루미늄 제련소에 주로 사용되고 있다.

구조용의 이종금속 이음부는 조선소에 많이 사용되는 데 그 이유는 강 선체와 AI 합금 상부구조물 사이에서 건전한 이음부를 만들 수 있기 때문이다.

여러 나라에서 건설중인 LNG탱크의 경우 알루미늄 저장 구형 탱크를 폭발압접법하여 제조함으로써 단순화, 고속화, 경제성 및 신뢰성을 겸비한 구조물을 만들 수 있다.

원자력, 우주, 극저온 산업분야에서의 파이프 이종금속 이음부는 파이프 이음부의 신뢰성이 높기 때문에 널리 사용되고 있다.

열간압연에 의해서 제조한 스테인리스 강 슬랩을 탄소강과 용접함으로써 스테인리스 강 roll-clad제품을 폭발압접으로 접합시킨 반제품이 생산되고 있다. Fig. 13와 Fig. 14는 폭발용접법을 이용해서 만든 제품의 예를 나타낸다.

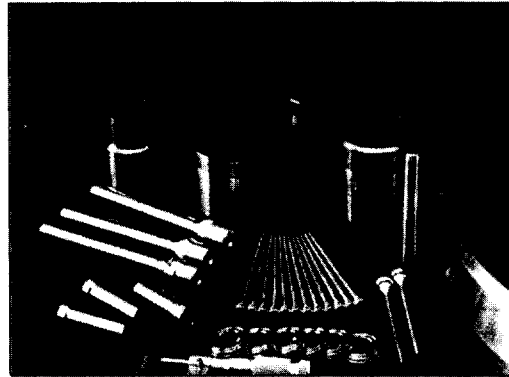


Fig. 13 Examples of Aluminum to Steel, Titanium to Aluminum and Titanium to Stainless Steel Tubular Transition Joints Machined from Explosion Clad Plate (explosion fabricators, Inc. photograph)

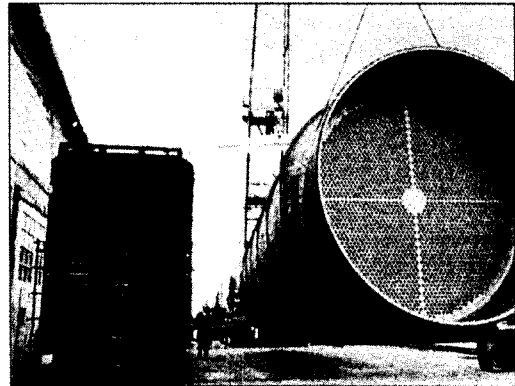


Fig. 14 Finished Vessel Fabricated from Explosion Clad Plate (Explosive Fabricators, Inc Photograph)

참 고 문 헌

1. B. Crossland, Mechanism of explosive welding and welding parameters, Explosive welding (1976), TWI, 2-4
2. B. Crossland, Explosive cladding-solution of technical problems, Explosive welding (1976), TWI, 5-8
3. D. K. C. Anderson, Explosive cladding-Available products, properties, and application, Explosive welding (1976), TWI, 8-12
4. AWS, Welding Handbook, 8th ed. vol. 2, 761-781
5. ASM, Metal Handbook, 9th ed., vol. 6, ASM, 705-717
6. 橋本達哉, 岡本郁男, 固相溶接 ろう付, 産報出版 (1978), 74-82