

## 解 說

大韓熔接學會誌  
第11卷第3號1993年9月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol. 11. No. 3. Sep., 1993

## 폭발접합의 원리와 특성

강 봉 용\* · 김 희 진\*

### The Basic Theory and Characteristics of Explosive Welding

B. Y. Kang\* and H. J. Kim\*

#### 1. 서 론

폭발접합(explosive welding)은 폭약의 폭발로 발생하는 순간적인 높은 충격에너지를 이용하여 하나의 용접금속(접합재)을 고속으로 가속시켜 다른 금속(모재)에 충돌시킴으로써 두 소재를 접합시키는 방법이다.

이 방법은 1차대전 중 폭발된 폭탄의 파편이 근처의 다른 금속제품에 접합되는 현상을 우연히 발견한 싯점부터 관심을 갖게 되었으며, 이후 미국의 Philipchuk와 Bois 등에 의해 제품의 제조를 위한 접합공정 기술이 개발되어 특허를 최초로 얻었으며 1963년도에 이르러 Dupont Co.에 의해 폭발접합에 대한 현상학적인 이론규명과 함께 본격적으로 상업화된 접합 방법이다.<sup>1, 2)</sup> 폭발접합법은 폭약의 폭발음으로 인한 소음공해 때문에 접합장소에 제약을 받는 단점을 제외하고는 기존의 다른 접합법으로 접합이 곤란하거나 불가능한 이종금속의 접합에 적용이 가능하고 접합에 필요한 특수한 장치가 필요치 않으며 접합 속도가 매우 빠르다는 장점을 가지고 있다. 또한 접합하고자 하는 금속의 표면에 존재하는 오염층에 영향을 받지않고 접합에 의해 열영향을 거의 받지 않는 등의 많은 장점도 가지고 있다. 따라서 선진

외국에서는 폭발접합법을 이용하여 접합된 소재를 가공하여 화학 및 발전분야의 내부식, 내열성 등을 요하는 각종 플랜트 제품과 전기용, 구조용 및 극저온용의 transition joint를 비롯하여 가정용 요리기구에 이르기까지 매우 다양한 클래드(clad) 제품을 생산하고 있다.

이러한 폭발접합의 장점과 용도의 다양성에도 불구하고 국내에서 사용되는 동종 및 이종금속의 접합소재와 그 제품 등은 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 본 고에서는 폭발접합법을 응용한 국산화 제품개발을 위하여 폭발접합의 원리를 소개하고 합리적인 접합을 위해 고려되어야 하는 제반 공정변수와 접합부의 특성에 대하여 기존의 보고된 자료들을 토대로 기술하고자 한다.

#### 2. 폭발접합의 원리

폭발접합(explosive welding)은 폭약의 폭발로 발생하는 순간적인 높은 충격에너지를 이용하여 금속을 접합시키는 고상접합(solid state welding) 방법의 일종이다. 이 방법의 접합시공 요령은 Fig.1에 보인 바와같이 경사법(inclined arrangement)과 평행법(parallel arrangement)이 있다. 모재(parent plate)와

\* 정회원, 생산기술연구원

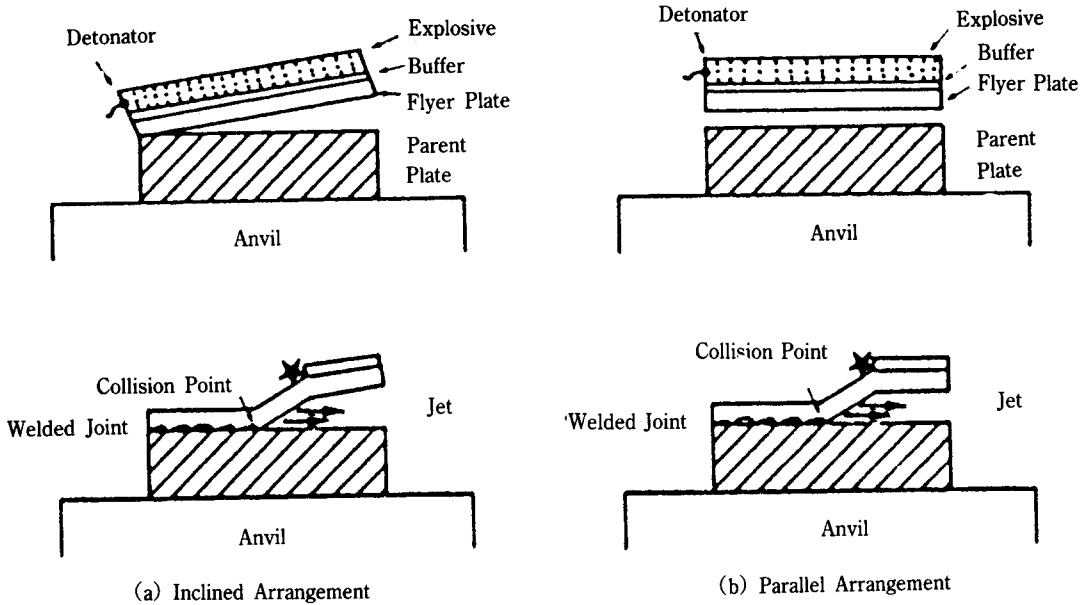


Fig. 1 Arrangement for explosive welding

접합재(flyer plate)를 anvil위에 일정한 간격(stand-off) 또는 일정한 각도를 유지하도록 설치하고 폭약의 폭발로부터 접합재의 표면을 보호하기 위하여 완충재(buffer)을 접합재의 표면에 덮는다. 그리고 그 위에 적당량의 폭약을 도포한 다음 그 일단에 설치된 뇌관으로 기폭하여 화약을 폭발시키면 접합재가 일정한 각도로 모재에 고속으로 충돌함으로써 모재 표면에서 접합이 이루어지게 된다.

폭발접합의 기본원리는 폭약의 폭발로 접합재와 모재사이에서 발생된 jet에 의해 접합표면에 존재하는 오염층이 제거되어 접합에 필요한 청결한 표면이 얻어지고 동시에 폭약의 폭발시 생긴 높은 폭발압력에 의해 접합되기 때문에 폭발접합을 위해서는 금속젯(metal jet)의 발생은 필수적이다<sup>3,4)</sup>. Fig. 2는 폭발접합시 폭약의 폭발이 B지점까지 일어났을때 발생하는 일련의 현상을 도식적으로 보여주고 있다. 이때 충돌점(collision point) S에서 접합재는  $V_p$ (flyer plate velocity)의 속도로 모재에 충돌하게 되는데, 이때 속도  $V_p$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$V_p = V_D \sin\phi = V_D \sin(\beta - \alpha) \quad (1)$$

$V_D$  : Detonation velocity of explosive  
(Collision point velocity,  $V_w$ 와 같음)

$V_p$  : Flyer plate velocity

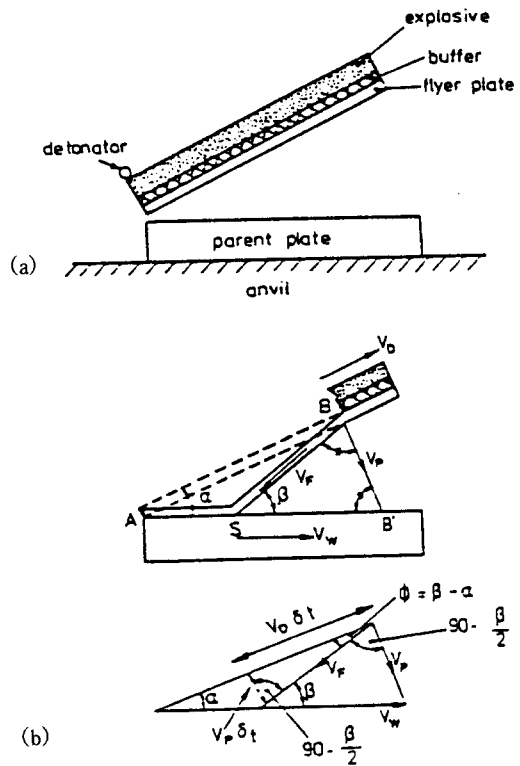


Fig. 2 Mode of collapse of flyer plate

- $\alpha$  : Preset angle  
 $\beta$  : Collision angle  
 $\phi$  : Dynamic bend angle

접합재가 모재에 충돌할때 충돌점 S에서는 매우 큰 정체압력(stagnation pressure)이 발생하는데 이 압력은 모재 및 접합재의 전단강도에 비하여 매우 높기 때문에 충돌점 S에서 모재 및 접합재는 극히 짧은 시간에 점성유체(invscid fluid)적인 거동을 나타낸다. 편의상 Fig. 3(a)와 같이 역방향의 속도를 도입하면 충돌점 S에서  $V_p$ 와  $V_f$  및  $V_w$ 와의 관계는 다음과 같다.

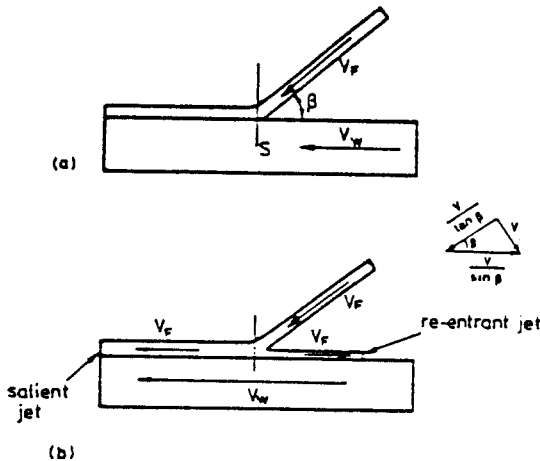


Fig. 3 Mechanics of collision : division of the main jet.

$$V_f = V_w = (V_p/2) // \sin \beta/2 \quad (2)$$

결과적으로 충돌점 S에서  $V_w$ (collision point velocity)로 흐르는 수평흐름(horizontal stream)과 접합재에서의 속도  $V_f$ 로 흐르는 경사흐름(oblique stream)이 서로 만나게 되는데 이때 모재가 접합재에 비해 단단한 경우 경사흐름(oblique stream)은 Fig. 3(a)에서 보는 바와같이 수평면(horizontal plane)으로 꺾기지만 수평방향으로의 운동량 보존(conservation of momentum)이 그대로 유지되지 않기 때문에 결국 Fig. 3(b)와 같이 경사젯트(oblique jet)는 S점에서 salient jet와 re-entrant jet로 분리된다. Jet의 양이 보존되기 위해서는 다음과 같은 식이 만족되어야 하고

$$M = M_s + M_R \quad (3)$$

$M$  : The mass of the flyer plate

$M_s$  : The mass deflected into the salient jet

$M_R$  : The mass deflected into the re-entrant jet

또한 운동량 보존(conservation of momentum)을 위해서 다음과 같은 식이 만족 되어야 한다.

$$M V_f \cos \beta = M_s V_f - M_R V_f \quad (4)$$

식(3)과 식(4)로부터

$$M_s = \frac{M}{2} (1 + \cos \beta) \quad (5)$$

$$M_R = \frac{M}{2} (1 - \cos \beta) \quad (6)$$

예로 폭약이 6500m/sec의 폭속(detonation velocity)을 갖고 충전된 폭약의 양이 접합재에 500m/sec의 속도(flyer plate velocity)를 준다면 식(1)로부터

$$\sin(\beta - \alpha) = 500/6500, (\beta - \alpha) = 4^\circ 25'$$

이 된다. 만약  $\alpha$ 가  $10^\circ$ 라면  $\beta$ 는  $14^\circ 25'$ 이 되고 식(6)으로부터  $M_R = 0.01568m$ 로서 접합재의 약 1.5%가 re-entrant jet가 된다. 일반적으로 jet는 모재와 접합재의 성분으로 이루어지는데 접합재가 모재에 비해 밀도가 비슷하거나 적을때는 대부분 접합재의 성분으로 구성된다.

상기 이론으로부터 폭발접합의 원리를 간단히 요약하면 (1) 화약의 폭발로 인해 접합재의 표면층이 벗겨져 고속의 re-entrant jet를 형성하고 (2) 이 jet가 두 판재의 표면에 있는 산화피막이나 오염된 피막을 제거하여 접합에 필요한 청결한 표면을 만들고 동시에 (3) 폭약의 폭발로 생기는 높은 압력으로 인해 접합계면에서 두 금속의 원자가 원자간 인력이 작용하는 거리까지 접근함으로써 금속학적인 접합이 이루어지게 된다<sup>4, 5)</sup>. Fig. 4는 두 금속의 충돌점에서 금속의 유동형태를 보여주고 있다. 단면 DBA와 EFG에서 BA와 EF층이 제거되고 점 B와 점 F가 D' B' F' G'와 같이 접합된다<sup>6)</sup>.

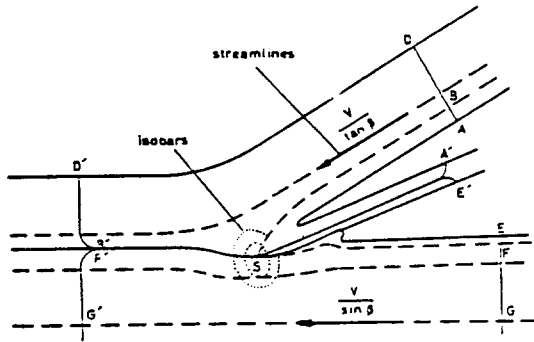


Fig. 4 Flow configuration in region of collision.

### 3. 폭발접합 공정 변수

폭발접합 설계시 최적의 접합 공정변수의 선택은 폭발접합부의 성능을 결정적으로 좌우한다. 이들 변수로서는 적절한 폭발속도를 갖는 폭약의 종류와 양, 그리고 판재간 거리(stand-off)이며 이들에 의해 결정되는 동적변수(dynamic variable)들이다<sup>7)</sup>.

#### 3.1 폭약(Explosive)

폭발접합시 사용되는 전형적인 폭약의 종류는 Table 1과 같다. 성능이 우수한 폭발접합부를 얻기 위해서는 접합하고자 하는 금속의 특성에 적절한 폭발속도,  $V_D$ (detonation velocity of explosive)를 갖는 폭약의 선택과 그 양을 결정하는 것이 대단히

중요하다. 일반적으로 폭발속도는 폭약의 밀도, 폭약의 양 및 불활성제의 혼합비에 좌우되며 폭약의 폭발로 부터 생기는 압력은 폭약의 밀도와 폭발속도에 비례한다. 판재간 거리와 접합되는 두 금속의 제 성질과 폭약량 사이의 관계는 다음과 같다<sup>8)</sup>.

$$L \left( \frac{\sigma e t^2}{E d} \right) \beta^2 \quad (7)$$

L : Amount of explosive per unit area of flyer plate

E : Modulus of elasticity of parent plate

$\sigma$  : Yield Stress of flyer plate

t : Thickness of flyer plate

d : Stand-off

$\beta$  : Collision angle

e : Specific gravity of flyer plate

일반적으로 폭발접합시 폭발속도가 큰 폭약을 사용할 경우 폭약의 폭발로 접합재(flyer plate)가 모재(parent plate)에 충돌할 때 발생하는 높은 압력으로 인하여 접합재가 손상되는 spalling현상이 발생할 수 있다<sup>9)</sup>. 그러므로 폭발접합에 사용되는 폭약은 접합재의 크기 및 물리적 기계적 성질을 충분히 고려한 후에 적절한 폭약을 선택하는 것이 바람직하다. 폭약의 폭발속도는 접합재의 음속(sonar velocity)보다 낮을때 접합이 가능한데 Dupont Co.의 특허에 의하면 그 상한선(upper limit)은 접합재 음속(sonar velocity)의 1.2배 정도인 것으로 알려져 있다. 폭발접합에 많이 사용되는 주요금속의 음속(sonar velocity)은 Table 2에 보인바와 같다. 폭약은 잘못 취급될 경우 엄청난 파괴

Table 1 Composition of some typical explosive Mixture

Explosive	Ingredients % by weight										
	Explosive			Oxidiser		Fuel			Miscellaneous		
	NG	TNT	PETN	Amm. Nit.	Sod. Nit.	Carbonaceous	Al.	Fuel Oil	Sod. Chi.	Amm. Chl.	Other
Anfo				94				6			
Trimonite 1		10		80			10				
Trimonite 3		20		80							
Ammonal		12		85			5				
NG Powder	10			80		10					
Permissible dynamite	9			67	5	9			10		
Polar Viking	8.4			70.7		8.8			10		2.1
	9			10	46.5	6					0.5
Pentolite		90/50	10/50								

**Table 2.** Sonar velocity in metal

Metal	Velocity(m/sec)
Aluminium	5,370
Copper	3,970
Magnesium	4,400
Molybdenum	5,170
Nickel	4,670
Titanium	4,700
Zirconium	3,770
Zinc	3,100
Steel	4,600

해를 입게 되므로 자격과 경험을 갖춘 사람에 의해 규정된 안전절차에 따라 주의깊게 취급되어야 한다.

**3.2 판재간 거리(Stand-off)**

평행법(parallel arrangement)에서 판재간 거리는 모재와 접합재 사이의 거리가 되고 경사법(inclined arrangement)에서 판재간 거리는 초기에 설정된 모재와 접합재 사이의 각도  $\alpha$ (preset angle)에 의해 결정된다. 이 판재간 거리는 접합계면에서의 파동(wave)의 모양, 폭발접합과정에서 접합재가 모재에 충돌하는 각도  $\beta$ (collision angle) 및 접합재가 모재에 충돌하는 속도  $V_p$ (flyer plate velocity)에 영향을 준다. 판재간 거리가 증가함에 따라  $\beta$ (collision angle)가 증가하고 wave의 크기 또한 증가 하는데 이는 어느 한계크기까지는 판재간 거리의 증가와 함께 증가하지만 그 한계크기 이상에서는 판재간 거리가 계속 증가 하더라도 wave의 크기는 오히려 감소하는 경향을 나타낸다<sup>9)</sup>. 그리고 정상적인 폭발접합에 필요한 속도  $V_p$ 를 얻기위해 흔히 사용하는 판재간 거리는  $0.1-t$ ( $t$ : 접합재의 두께)의 것을 사용하는데 이는 폭약의 종류에 따라 달라진다. 예로 Trimonite I의 폭약을 사용할 경우 판재간 거리를 접합재의 두께와 같게 하고 Anfo를 사용할 경우 판재간 거리는 접합재 두께의 2배 정도로 한다<sup>10)</sup>. 결국 판재간 거리를 적게할 경우 높은 폭발 속도를 갖는 폭약을 사용하고 판재간 거리를 크게할 경우는 낮은 폭발속도를 갖는 폭약을 사용하는 것이 보통이다.

**3.3 접합시공법에 따른  $V_w(=V_D)$ ,  $V_p$  및  $\beta$  사이의 관계<sup>7)</sup>**

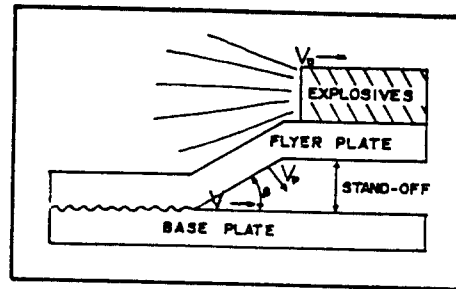
폭발접합부의 품질은 초기 접합설계시 설계자에

의해 결정되는 폭약의 종류 및 량과 접합시공방법(welding configuration)에 따른 판재간 거리에 의해 좌우되는 폭약의 폭발속도  $V_D$ (detonation velocity of explosive), 접합재의 속도  $V_p$ (flyer plate velocity) 및 접합재와 모재간의 충돌각  $\beta$ (collision angle) 등의 동적변수(dynamic variable)들이 접합과정에 있어 어떠한 역할을 하는지를 이해 하는것이 중요하다. Fig. 5 (a)의 평행법(parallel arrangement)의 접합시공법에 있어 상기 접합변수들 사이의 관계는 다음과 같이 표현될 수 있으며

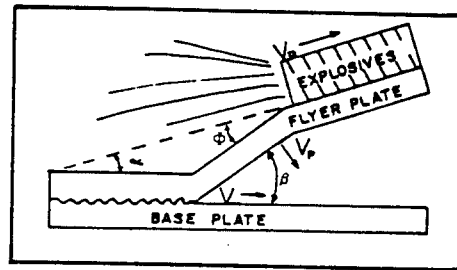
$$V_p = 2V_w \sin \beta/2, V_w = V_D \tag{8}$$

Fig. 5(b)의 경사법(inclined arrangement)의 접합시공법에 있어서의 접합변수들 사이의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$V_p = V_D \sin \phi \tag{9}$$



(a) Parallel Arrangement



(b) Inclined Arrangement

- $V_D$  = detonation velocity explosive
- $V_p$  = flyer plate velocity
- $V_w$  = collision point velocity
- $\phi$  = dynamic bend angle
- $\alpha$  = preset angle
- $\beta$  = collision angle

**Fig. 5** Explosive welding configuration

$$V_w = \frac{V_D \sin \phi}{\sin(\alpha + \phi)}, \quad (\phi = \beta - \alpha)$$

### 3.4 폭발접합을 위한 최적변수 조건

전술한 바와같이 폭발접합이 이루어지기 위해서는 jet 현상이 필수적으로 일어나야 하는데 이를 위해서 상기 접합변수들이 다음과 같은 경계조건을 가져야 한다.

#### 3.4.1 금속젯트(metal jet)형성을 위한 임계각

상기 식 (8)과 (9)는 각각의 접합시공법에 따른  $V_w$ ,  $V_p$  및  $\beta$ 의 관계를 보여주고 있다. 여기서 속도  $V_w$ (collision point velocity)가 어느 임계값 이상의 속도(즉  $V_w > \text{critical } V_w$ )일 경우 충돌각  $\beta$ (collision angle)는 임계 충돌각  $\beta$ (critical collision angle)이하가 된다. 이때는 속도  $V_p$ (flyer plate velocity)와 관계없이 금속젯트가 발생하지 않을 뿐만아니라 접합도 이루어 지지 않는다. 따라서 충돌각  $\beta$ 가 임계값 이상의 값을 갖도록 속도  $V_w$ 는  $V_w/S < 1$ ( $S$ : sonar velocity in parent plate)여야 한다. 일반적인 충돌각  $\beta$ 값은  $5^\circ - 25^\circ$ 로 알려져 있다<sup>5)</sup>.

#### 3.4.2 임계 충돌압력(critical impact pressure)

폭약이 폭발할때 충돌점에서의 충돌압력(impact pressure)은 jet가 형성될 수 있도록 충분히 커야 하는데 이는 금속의 동적항복응력(dynamic yield stress)보다 훨씬 큰 값이어야 한다. 충돌점에서의 충돌압력(impact pressure)은 접합재의 속도  $V_p$ 에 의해 결정될 수 있다<sup>7)</sup>.

$$V_p = (\sigma_{TS}/\rho)^{1/2} \quad (10)$$

$\sigma_{TS}$ : Ultimate tensile strength of flyer plate

$\rho$ : Density of flyer plate

#### 3.4.3 충돌점에서의 임계 천이속도(critical collision point transition velocity)

일반적으로 폭발접합 계면에 형성된 wave의 모양이 고르고 뚜렷한 형상을 가지면 접합이 잘 이루어졌음을 의미하지만 wave의 진폭은 접합부의 강도와는 아무런

상관이 없다. 이러한 wave도 충돌점의 속도  $V_w$ (collision point velocity)가 어떤 임계값을 가질때 형성되는데 이 임계값을 예측할 수 있는 식은 다음과 같다<sup>11)</sup>.

$$R_T = \frac{(\rho_F + \rho_P) V_T^2}{2(H_{dF} + H_{dP})} \quad (11)$$

$R_T$ : Reynold's number

$V_T$ : The flow transition velocity

$H_{dF}$ : Flyer plate static hardness

$H_{dP}$ : Parent plate static hardness

$\rho_F$ : Flyer plate density

$\rho_P$ : Parent plate density

이때  $R_T$ 의 값은 접합시공(welding configuration)방법에 상관없이 8.1-13.1의 값을 갖는다.

#### 3.4.4 접합재의 kinetic energy와 충돌영역에서의 열 분산 특성

폭발접합시 접합재가 모재에 고속으로 충돌할때 kinetic energy가 발생되는데 접합과정에서 그 일부가 변형과 마찰로 인해 열(heat)로 바뀌어 접합계면에서의 온도가 급상승하여 일어나는 용융(melting)현상이 생길 수 있다. 이 kinetic energy가 지나치게 클 경우 wave의 전, 후에 jet material이 용융 및 급냉되어 형성된 pocket과 냉각공(cooling cavity)이 생기게 될 뿐만아니라 이들 용융대(melted zone)가 합체되어 연속적인 용융층(continuous melted layer)을 형성하여 접합부의 충격저항은 물론 접합강도를 크게 저하시킨다. 그러므로 접합계면에서 우수한 접합강도를 얻기 위해서는 이러한 결함들이 생기지 않도록 최적의 접합변수  $V_p$ (flyer plate velocity)를 선정하여야 한다. 이를 위한 max.  $V_p$ 를 결정하는 식은 다음과 같다.<sup>12)</sup>

$$V_p = \frac{1}{N} \frac{(T_{MP} C_B)^{1/2}}{V_w} \frac{(K C C_B)^{1/4}}{(\rho H)^{1/4}} \quad (12)$$

$T_{MP}$ : Melting point temperature

$C_B$ : Bulk sound speed

$K$ : Thermal conductivity

$C$ : Specific heat

$V_w$ : Collision point velocity

$\rho$ : Density of flyer plate

$H$ : Thickness of flyer plate

$N$ : Constant

건전하고 품질이 좋은 폭발접합부를 얻기 위해서는 상기 서술한 접합변수들의 경계조건을 적절히 설정하여야 한다. 상기 모든 접합변수들은 다음과 같이 한 식으로 표현될 수 있다.

$$V_p = 2V_w \sin \beta/2, \quad (\beta = \phi + \alpha) \quad (13)$$

이 식은 평행법 및 경사법에 대해서 모두 유효하다. 이 관계를 도식적으로 나타내면 Fig. 6과 같으며 최적의 접합이 이루어지기 위해서는 동적 접합변수들이 빗금친 영역내에 존재하여야 한다<sup>7)</sup>.

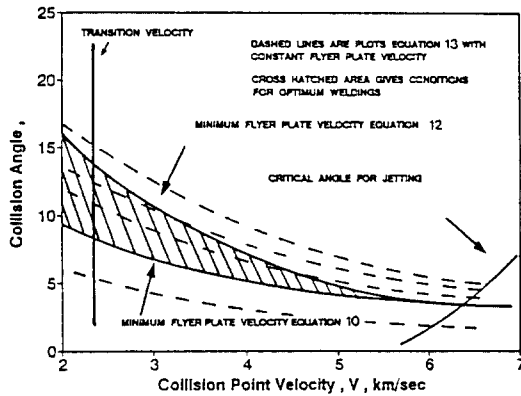


Fig. 6 Schematic of equation 13 with the four boundary conditions giving the optimum conditions for welding.

#### 4. 폭발접합부의 특징

폭발접합된 금속의 접합계면은 Photo. 1에서 보는 바와 같이 규칙적인 파동(wave)의 형태를 띠는 것이 특징이다. 폭발접합과정에서 접합재와 모재의 충돌점에서 발생하는 압력이 접합되는 금속의 전단강도에 비해 훨씬 크기 때문에 금속은 유체와 같은 거동을 하여 소성적으로 흐르게 되는데 접합계면의 파동은 유체가 장애물 주위를 흐르는 모습과 비슷하여 유속이 느릴 경우 유체가 장애물 주위를 유연하게 흐르지만 유속이 빠를 경우 유체는 장애물 주위에서 급격한 요동을 하는 모습과 비슷하다. 폭발접합의 경우는 충돌점에서의 높은 압력이 장애물 역할을 한다<sup>13)</sup>. 이 파동(wave)은 모재에서의 이동속도  $V_w$ (collision point velocity)가 어떤 임계값 이상인 경우에 생기게 되는데

이 임계값 이하에서는 접합공정과 관련된 접합변수들이 약간만 변화하여도 접합계면에서 미접합부(lack of bonding)가 생길 수 있다. 파동의 앞과 뒤쪽 부위

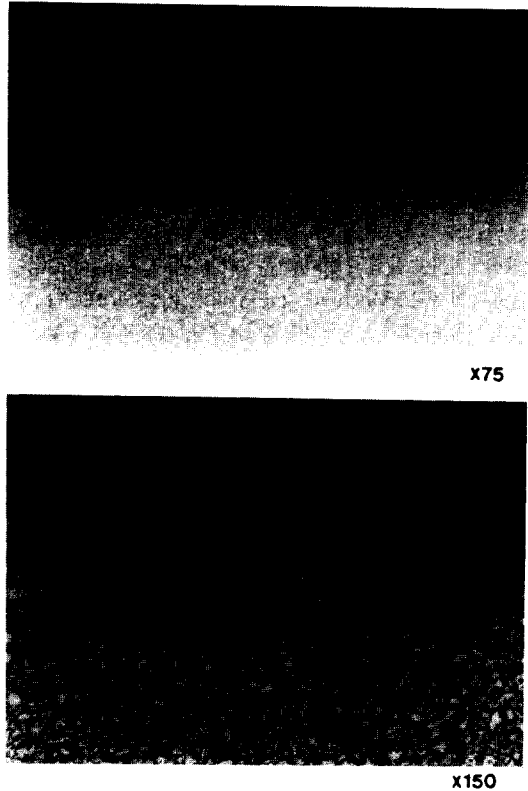


Photo. 1 Bond zone formation in Titanium(top) explosively welded to Carbon Steel(bottom)

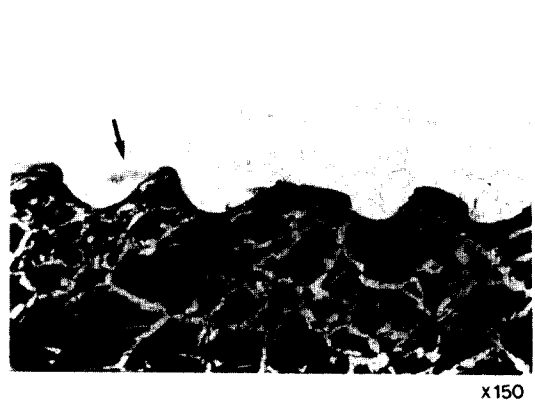


Photo. 2 Pocket in Carbon Steel(top) explosively welded to Naval Brass(bottom)

에는 Photo. 2에서 보는 바와 같이 금속이 고화(solidified)된 pocket이 존재할 수 있는데 이는 jet를 형성하고 있는 접합재와 모재의 성분으로 이루어져 있으며 접합과정에서 접합재의 kinetic energy의 일부가 열로 변함으로 인해 접합계면에서 온도가 급상승 하여 jet material의 일부가 용융되어 급냉된 부분이다. 이의 특성은 폭발접합된 두 금속이 고용체를 형성할 경우는 연성(ductility)을 갖게 되지만 금속간화합물을 형성할 경우에는 매우 취약하여 접합부의 성능에 많은 영향을 끼치게 된다. 접합계면에 형성된 pocket의 크기 및 분포는 접합부의 성능에 영향을 미치는데 이는 접합과정에서의 동적 변수(dynamic variable)인 속도  $V_p$  (flyer plate velocity), 속도  $V_w$  (collision point velocity) 및 충돌각  $\beta$  (collision angle) 등에 의해 좌우된다. 이들 변수값들이 지나치게 클 경우 pocket의 크기가 커질 뿐만 아니라 이들이 합체되어 접합계면에 연속용융층을 형성하여 접합부의 성능을 크게 저하시킬 수 있다. 그러나 이들의 크기가 적을 경우는 접합부의 성능에 그다지 영향을 주지 않는다<sup>9)</sup>. 또한 모재에서의 속도  $V_w$ 가 지나치게 클 때는 접합계면에서 전단띠(shear band)가 생길 수 있으며 이는 접합재 표면 방향으로의 전단균열로 발전할 수 있다. 근본적으로 접합계면의 특성은 폭발접합의 주요변수인 폭약의 폭발속도  $V_D$  (detonation velocity of explosive) 및 양 그리고 판재간거리(stand-off)에 의해서 결정되는 동적변수(dynamic band angle)인 속도  $V_p$ , 속도  $V_w$  및 충돌각  $\beta$  (collision angle) 그리고 접합재의 두께 및 모재와 접합재의 물리적 기계적 성질 등에 좌우되기 때문에 폭발접합시 이들의 영향을 충분히 고려하여 접합변수를 설정하는 것이 중요하다<sup>13)</sup>.

## 5. 맺음말

본 고에서는 폭발접합에 대한 원리, 접합계면 특성 및 접합공정에 영향을 미치는 변수들에 대하여 기술하였다.

폭발접합은 접합장소에 대한 제약을 제외하고는 저렴한 시설 투자 및 간편한 방법으로 고부가가치의 제품을 생산할 수 있는 장점 때문에 선진 외국에서는 각종 산업분야에 필요한 제품을 생산하는데 많이 응용하고 있다.

현재 국내에서는 사용되고 있는 다양한 폭발접합

제품을 전량 수입에 의존하고 있는 실정이기 때문에 이를 국산화하기 위해서 폭발접합에 대한 기초적인 연구와 이의 응용에 대한 관심을 기울여야 할 것으로 사료된다.

## Reference

1. J.A. Yoblin, J.D. Mote, and L.E. Jensen, "Explosive Welding and Cladding-Overview of the Process and Selected Application," Advances in Joining Technology, Brook Hill Publishing Co., 1976
2. S.K. Banerjee and B. Crossland, "Mechanical Properties of Explosively-Cladded Plates," Metal Construction and British Welding Journal, July 1971
3. O.R. Bergmann, G.R. Cowan and A.H. Holtzman, "Experimental Evidence of Jet Formation during Explosion Cladding," Trans. Met. Soc. of AIME, 236 (1966), pp.646~653
4. A. Pocalyko, "Fabrication of Explosive-welded Titanium-clad Composites," Welding Journal, Jan. 1987
5. B. Crossland, "Review of the Present State-of-the-Art in Explosive Welding," Metals Technology, Jan. 1976
6. G.R. Cowan and A.H. Holtzman, "Flow Configuration in Colliding Plates," Explosive Bonding, J. Appl. Phys., 34(1963), pp.928~939
7. Steve H. Carpenter and Robert H. Wittman, "Recent Developments in the Theory and Application of Explosive Welding," SME Technical Paper No. MF 74-819, 1974
8. S. Carpenter, R. H. Wittman and R.J. Carlson, "The Relationship of Explosive Welding Parameters to Material Properties and Geometry Factor," Proc. 1st Int. Conf. of the Centre for High Energy Forming, (1967), 1.2. 1-1. 2.23
9. "Explosion Welding," Welding Handbook, 8th, Vol. 2., pp.766~781
10. B. Crossland, "Explosive welding of Metals and its Application," Clarendon Press, Oxford, (1982), pp.65~83
11. G.R. Cowan, O.R. Bergmann and A.H. Holtzman, "Mechanism of Bond Zone Wave Formation in Explosion-Clad Metals, Met. Trans., 2, 3145-3155



12. R.H. Wittman, "Use of Explosive Energy in Manufacturing Matalic Materials" 2nd Int. Sym. 9-12, Oct. 1973
13. "Explosion Welding," Metal handbook, 9th, Vol. 6, pp.705~717