

(論 文)

## 폭발용접에서 선형 충격파에 관한 실험적 연구

김청균\* · 문정기\*\*

(1992년 1월 27일 접수)

### Experimental Study on the Line Shock Wave in Explosive Welding

Chung Kyun Kim and Jung-Gi Moon

**Key Words :** Explosive Welding(폭발용접), Detonation Wave(폭굉파), Jetting(제팅), Point Detonation(점기폭), Line Detonation(선기폭), Detonation Cord(기폭선), Stand-off Distance(이격거리)

#### Abstract

In this paper results from experimental studies on the line wave detonation of explosive welding were presented. Using the ultra high speed camera, the ling wave generation during the bonding, process of composite materials was observed with an equilateral triangle lens. Experimental results confirmed the line wave formation of the shock front. And the results indicated the effectiveness of the ling wave detonation method in the explosive welding of similar or dissimilar metals.

#### 1. 서 론

폭약의 폭발시 발생하는 거대한 폭발 에너지는 소재의 성형(forming), 경화(hardening) 또는 이종 소재의 접합(bonding) 등에 널리 이용되어 왔다. 폭발 에너지를 이용한 2개 또는 그 이상의 재료를 접합하려는 노력이 그동안 계속되어 왔으며, 특히 용융점 차이가 큰 소재, 경도 차이가 큰 소재, 열팽창 계수등 기계적 성질이 크게 다른 소재 간의 접합에 많은 연구 진행되어 왔다.

Carl이<sup>(1)</sup> 수행한 일련의 폭약 실험 중에 두 소재 간의 접합현상을 발견한 이후로 1959년 Philipchuk가<sup>(2)</sup> 폭발 용접에 관한 특허를 출원하면서 폭발용접의 산업체 이용 가능성을 한층 높이는 계기가 되었다. 초기에는 접합기술 개발의 실용화 측면보다

는 순수한 과학적인 호기심이 더 큰 연구 관심사였으나 최근에는 여타 접합 방법에 비하여 경쟁력을 갖추게 되면서 상업적인 응용연구가 많이 진행되고 있다. 50년대 후반에 폭발에너지가 금속의 접합기술에 유용하다는 것이 알려지면서<sup>(3-6)</sup> 자동차, 선박, 원자로, 미사일, 항공우주 산업을 중심으로 이에 관련된 연구가 활발하게 진행되고 있다. 상업적으로는 미국의 듀폰사가 이종금속의 접합에 성공하였고,<sup>(7,8)</sup> 최근에는 금속/세라믹과 같은 복합 소재의 접합에도 널리 응용되는 단계에 와 있다.

폭약이 폭발할 때 발생하는 불연속 초고압 폭굉파(detonation wave)가 극히 짧은 시간에 형성되면서 1,000~9,000 m/s의<sup>(9)</sup> 속도로 폭약내를 전파하게 된다. 이 때 형성된 불연속 초고압 충격파의 운동 에너지가 부재에 전달되어 부재가 모재에 경사지게 부딪힐 때 순간적으로 발생하는 제팅(jetting)현상에 의하여 두 소재가 접합을 하게 되는 것을 폭발용접(explosive welding)이라 한다.

\*정회원, 홍익대학교 기계공학과

\*\*정회원, 해사기술연구소 방폭연구실

폭발용접은 이와 같은 불연속 초고압 충격파를 복합 재료의 접합에 이용하는 관계로 폭약의 폭발시 발생하는 순간 충격파가 폭발용접의 성능에 미치는 영향에 관한 연구는 비교적 많이 진행되었다. (10~17) 그러나 폭발용접에서 초고압 충격파 자체가 실제로 전파되는 모형을 실험적으로 제시된 경우는 거의 찾아 볼 수가 없었다.

폭발 에너지를 이용한 접합기술 해석에서 가장 중요한 요소 중의 하나인 충격파의 전파방식은 재료의 접합강도에 커다란 영향을 주고 있는 것으로 알려지고 있다. 그래서 본 연구에서는 폭발용접 성능평가에 중요한 영향을 주고 있는 기폭방법을 비교하고, 선형 충격파의 발생방법과 이에 의한 접합 결과를 실험적으로 나타내고자 한다.

## 2. 기폭방법

두개 이상의 재료를 접합하기 위하여 사용되고 있는 폭발 용접의 충격파 전파방식에는 일정한 점을 중심으로 구형(spherical)충격파를 형성하면서 전파되는 점 기폭(point detonation) 전파방식과 충격파가 일정한 거리를 통과한 이후에는 선형 또는 평면(line or plane)의 충격파가 형성되는 선 기폭(line detonation) 또는 평면 기폭(plane detonation) 전파방식으로 분류할 수 있다. 폭발용접에서는 기폭관(dettonator)의 설치 방법에 따라 재료의 접합 특성에 많은 영향을 주고 있는 것으로 알려지고 있으며 기폭관의 설치는 대단히 중요한 연구의 대상이 된다.

기폭관의 설치는 기폭관의 종류나 기폭방식 및 접합재료의 기하학적인 형태 등에 따라 달라지며 통상 기폭관으로서는 Fig. 1과 같이 평면(plain detonator), 전기식(electric detonator), 지연 기폭관(delay detonator)이 있으며 어떤 종류의 기폭관이라 할지라도 안정된 기폭 특성이 요구된다.

또한, 폭접 과정 중에 있어서 접합 특성에 가장 중요한 인자중의 하나는 진행되는 폭평파가 접합하고자 하는 전체면적에 걸쳐 고르게 전파되어야 하는 것으로 이론적으로 무한대의 반경을 갖는 구형 충격파 또는 파의 진행 방향에 정확히 직각이 되는 선형(또는 평면) 충격파의 형성이 바람직하다. 이와 같은 문제점은 집합재료의 크기가 커진다는가 또는 정밀접합이 요구되는 경우에 보다 심각한 기술적 제약에 부딪히게 된다.

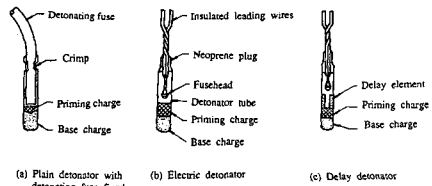


Fig. 1 Detonators

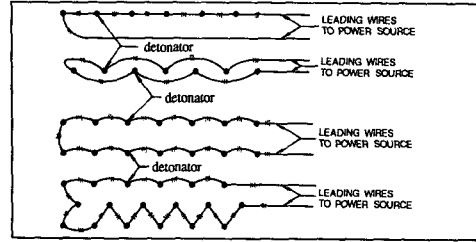


Fig. 2 Recommend method for connecting multi-detonators: A series circuit provides a single path for the current through all of the caps.

이러한 선형 충격파의 생성을 위해서는 Fig. 2와 같이 가장 단순한 방법으로 기폭관의 숫자를 늘려 동시에 기폭시키는 여러가지 직렬 결선방법을 생각할 수 있으나 기술적으로 많은 어려움이 제기되고 있기 때문에 본 실험에서는 위의 방법을 배제하고 폭약렌즈(explosive lens)방법을 채택하여 1개의 기폭관만으로 선형 충격파를 생성하도록 하였다.

## 3. 폭약렌즈에 의한 평면 폭평파의 발생

폭약렌즈는 성형폭약(shaped charge)의 일종으로 1800년대의 증공폭약(hollow charge)에서 그 출발의 기본이 되며 Munroe효과 또는 Neuman효과로서 군사적인 용도에서 보다 잘 알려진 내용이다. (18)

Fig. 3에서 보는 바와 같이 선형 충격파 발생 방법은 Slapper, Du Pont, Lens의 형태가 있고, 평면 충격파는 Mouse Trap 또는 PBX/Nitroguanidine

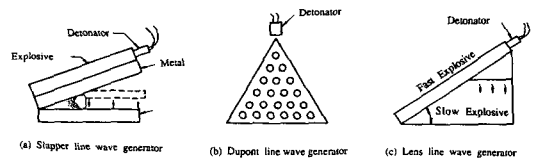


Fig. 3 Line wave generators

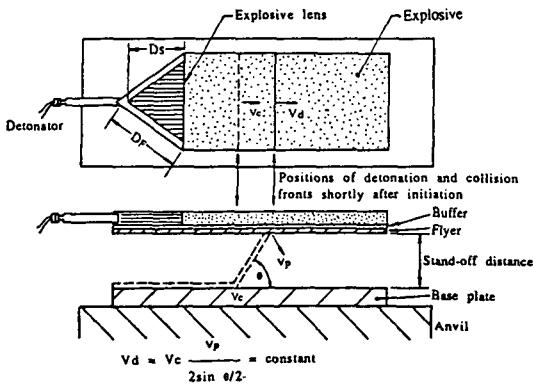


Fig. 4 Explosive lens with parallel set-up geometry of explosive cladding,  $D_F=6800\text{m/s}$ ,  $D_S=3500\text{m/s}$  approximately

의 종류가 있으며 Fig. 4에서와 같이 이론적으로는  $D_F/D_S=2$ 가 되는 경우 즉, 2종의 서로 다른 폭약이 2배의 폭속을 갖는다고 가정하면 삼각형의 아래 부분에서는 완전한 직선형태의 선형 충격파를 얻을 수 있게 된다. 이러한 완벽한 형태의 선형 충격파 생성은 제반 물성이 양호한 제팅효과를 만들어내고 궁극적으로 소재는 완벽한 접합을 이루게 된다.

폭발용접에서 재료가 접합되는 과정은 폭약의 기폭⇒부재의 가속 및 변형⇒부재와 모재가 접합점에서 순간적으로 충돌되면서 순차적으로 진행된다. 따라서 이종재료를 접합하기 위해서는 폭약의 기폭에 의하여 폭광속도로 부터 충분한 에너지가 있어야 하고, 부재가 변형되면서 충분히 가속될만한 이격거리(stand-off distance)가 있어야 하며, 충돌지

Table 1 Chemical composition and explosive properties of Ammonium Nitrate

Chemical Composition		Explosive Properties	
· Nitroglycerine	6.0	· Detonation Velocity by the Dautriche Method	3,500 m/s
· Nitrocellulose	0.1	· Bulk Density	0.96~1.05 g/cc
· Ammonium Nitrate	66.0	· Strength(R.W.S) by the Ballistic Test	0.5%
· Sodium Nitrate	12.0	· sensitivity (Cap-Sensitive)	No.6
· Carbonaceous Materials	8.0	· Theoretical Energy	880 cal/g
· Sodium Chloride	6.0		
· Stabilizer	1.0		

Table 2 Chemical composition of bonding metals

Steel (Base Plate)		Aluminium (Flyer)	
Fe	97.063	Al	99.529
C	>1.284	Mg	<0.008
Si	0.331	Si	0.057
Mn	0.796	Fe	0.342
P	0.0075	Mn	<0.024
S	<0.0048	Ni	0.023
Ni	<0.032	Zn	<0.016
Cr	0.103	Pb	<0.096
Mo	0.036	Sn	<0.008
V	0.003	Ti	0.017
Ti	<0.002	Cr	0.008
Co	0.027		
W	0.069		

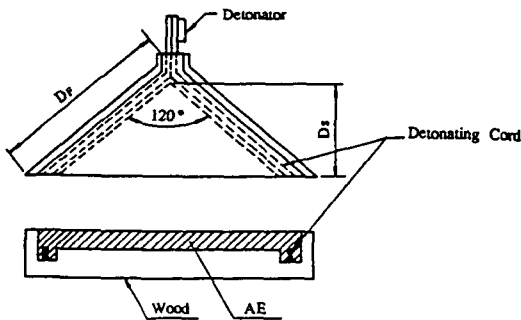


Fig. 5 Explosive lens used in this experiment which has 120° apex angle, and consists of Ammonium Nitrate and PETN

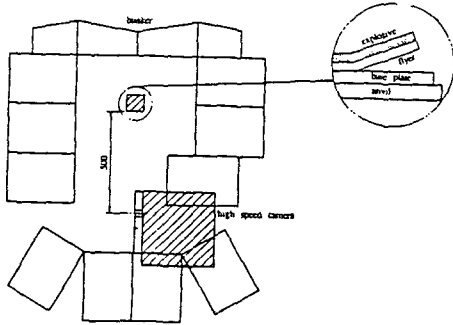


Fig. 6 Arrangement for explosive cladding experiment: rough measures are 4.7m(L) × 8.3m (D) × 4.0m(H), mode of collapse shows before detonation process.

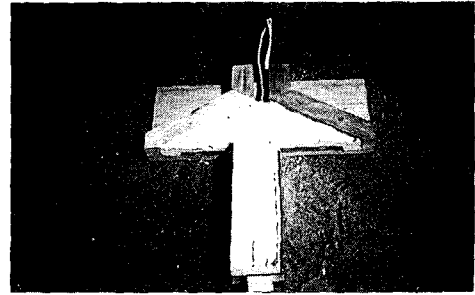


Fig. 7 Experimental arrangement of explosive bonding with explosive lens

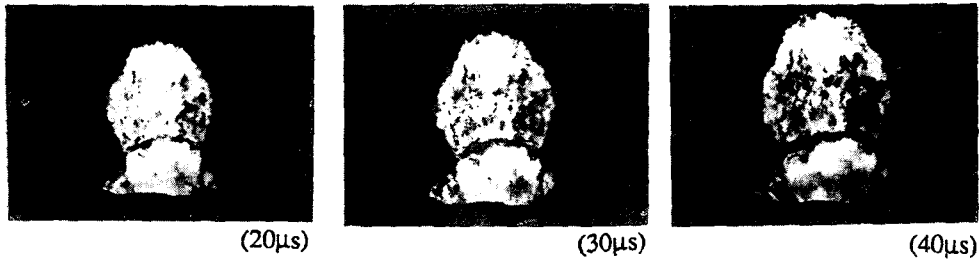
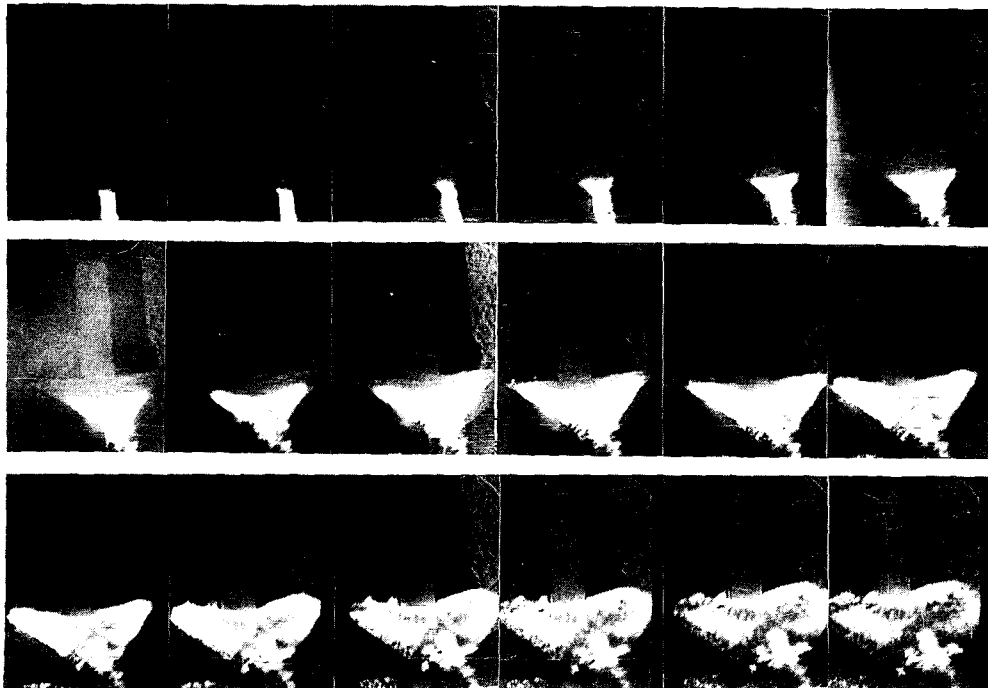


Fig. 8 Deflagration of explosive lens, not fully developed detonation of generator



(Frame interval : 2μs)

Fig. 9 Series of formats of explosive lens, which shows little distortion of line wave at the center

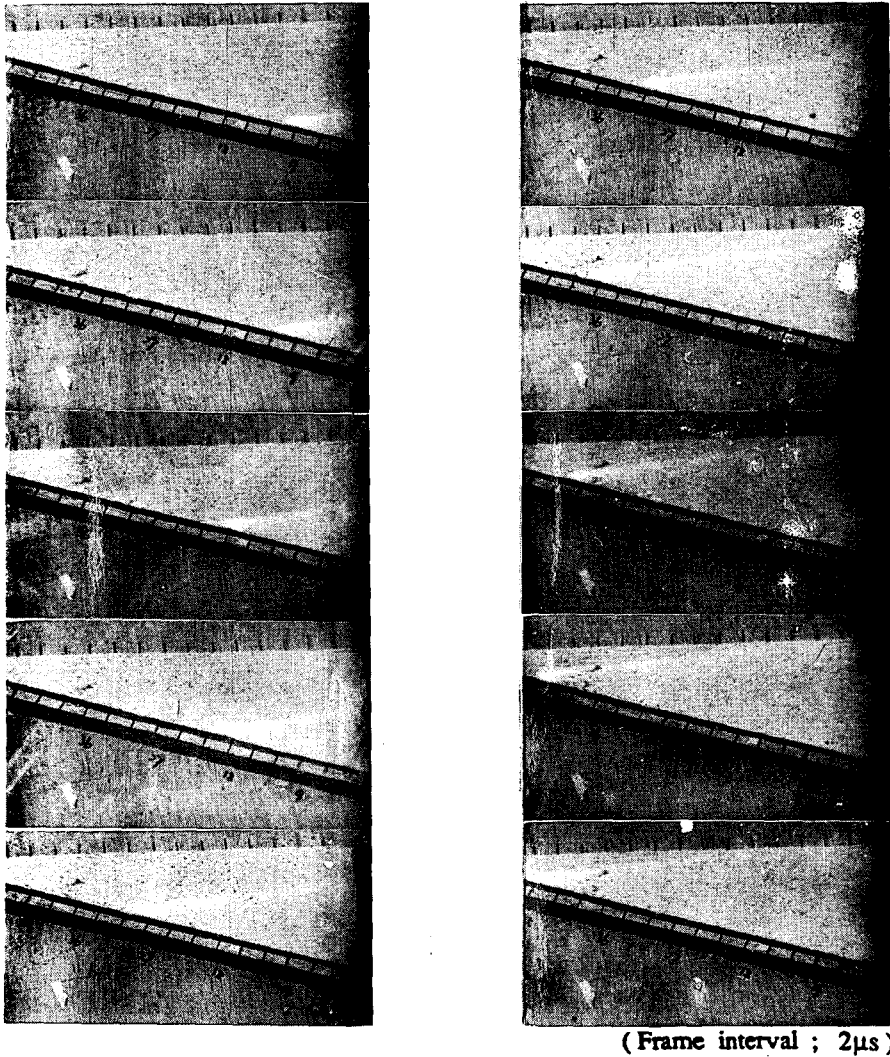


Fig. 10 Simple expression of isosceles triangle lens generated stable plane wave



Fig. 11 Explosively bonded bi-metal, interface between aluminium flyer and steel backing metal

점 (collision point)의 연결선이 폭약에 대하여 선형적으로 존재하여야 하는 조건을 만족시켜야 한다.

#### 4. 실험장치 및 방법

실험에서 채용한 기폭방법은 1점 기폭(one point detonation)으로 폭약렌즈를 설계·제작하여 사용하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 꼭지각이 120°인 이등변 삼각형을 기본구조로 하고 주 폭약의 약 2배의 폭속을 갖는 도폭선을 이등변 삼각형의 가장

자리에 설치한 다음 양쪽 도폭선의 끝에 전기식 기폭관을 설치하여 정전용량 방식에 의해 전기점화시켜 뇌관에 의해 기폭된 에너지가 2차적으로 도폭선을 기폭하고, 이어 주폭약을 기폭하여 직선과 같은 충격파가 형성되도록 하였다.

본 실험에서 사용된 기폭관은 고유 지연시간(function time)이 8KV일 때 약 80 $\mu$ s를 갖는 전기식으로 예비실험을 통하여 실용상 큰 문제가 없는 것으로 확인되었다.

실험에 사용되는 주폭약은 2차폭약(secondary explosive)의 일종인 Ammonium Nitrate로 화학 성분과 폭약 특성은 Table 1과 같다. 폭발접합에 사용된 모재는 일반 구조용 강이고, 부재료는 알루미늄 소재를 사용하였다. 이 재질들의 화학성분은 Table 2에서와 같이 보여주고 있다.

선형 충격파 형성을 확인하기 위하여 최대 10<sup>6</sup> fps급 VT-101 회전거울방식의 초고속 카메라를 사용하였다. 실험장치의 개요는 Fig. 6과 같이 사각형의 병커내에 용접하고자 하는 재료를 설치하고 고속 카메라로 부터의 시간지연발생기(time delay generator)의 신호에 따라 기폭관을 기폭시키도록 하였다.

### 5. 실험결과 및 고찰

선형 충격파의 생성을 위한 폭약렌즈의 실험결과 얻은 연속사진은 Fig. 7, 8 및 9와 같다. Fig. 7은 렌즈와 접합재료의 설치 예를 보여주고 있고, Fig. 8은 렌즈 내의 주폭약이 폭광에 이르지 않고 폭연만의 과정으로 완료된 것을 보여주고 있으며, Fig. 9는 선형 충격파 발생기구를 이용하여 폭발실험을 수행한 결과 선형에 가까운 완전한 폭광파를 얻었으나 가운데 부분의 찌그러짐을 보여주고 있다. 이는 폭약의 폭광속도를 조절하든지 렌즈의 기하학적 형상을 변경할 필요가 있음을 나타내고 있다. 한편, Fig. 10은 이등변 삼각형의 한쪽면으로도 평면파를 완전하게 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

실제 실험은 Fig. 9의 경우를 약간의 설계 변경 즉, 동일한 폭약을 사용하되 폭지각을 약 2~3<sup>o</sup> 정도 더 크게하여 완전한 평면파를 생성시키고 접합에 채용한 것으로 이의 접합결과는 Fig. 11과 같다. 사진에서 화살표는 접합이 형성되고 있는 파형의 진행 방향을 표시하고 있다.

폭발용접에서 제딩현상이 잘 발달하게 되면 양질

의 접합이 이루어진 것으로 알려져 있는데 선기폭 접합기술을 이용한 Fig. 11의 A1/Steel 접합결과는 제딩현상이 잘 형성된 것을 나타내는 전형적인 파도모형이 잘 발달되어 있는 것으로 보아 A1/Steel의 이중금속간 결합이 양호하게 이루어졌음을 알 수 있다.

결과적으로 폭발에너지를 이용한 이중재료의 접합은 본 연구에서 확인된 것 처럼 선형 충격파 기폭방식을 채택하면 접합강도가 우수한 양질의 복합 재료를 간편하게 제작할 수 있다.

### 6. 결론

폭약의 폭발시 발생되는 초고압 충격파의 전파에 의한 일련의 폭발접합에 관한 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 여러가지 기폭방법을 검토하고 폭약렌즈의 설계에 의한 선형충격파를 생성하였다.

(2) 폭약렌즈의 폭지각은  $D_F/D_S$ 가 2가 되는 경우, 그 기하학적인 조건에 따라 120<sup>o</sup>에 근사하게 일치됨을 보였다. 또한 적절한 폭약의 선택이 이를 뒷받침해주었다.

(3) 본 연구에서 제시된 선형 충격파 발생기구를 사용하여 폭발실험을 수행한 결과, 충격파의 선단이 선형으로 전파되고 있는 형태를 고속 카메라로 촬영하여 전파모형을 확인하였다.

(4) 생성된 충격파를 이용한 알루미늄/철강 소재의 접합을 수행한 결과, 양호한 접합상태를 설명해주는 접합계면에서 파형이 잘 형성되어 있음을 보여주었다. 이것은 접합강도에 중요한 요소인 제딩 현상이 잘 발달되었다는 것을 의미하며 이중/동종 복합소재의 접합에 있어서 대단히 유용하다는 것을 알 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 1991년도 교육부 신소재 분야 학술연구 조성비 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고 문헌

(1) Carl, L. R., 1944, "Brass Welds Made by Detonation Impulse," Metal Progress, Vol. 46,

- No. 7, pp. 102~103.
- (2) Philipchuk, V. and Bois, L.R., 1959, US Patent Application, Series No. 817706,
- (3) Cook, M. A., 1958, "The Science of High Explosive".
- (4) Philipchuk, V., 1961, "Welding Forging and Cutting with Explosives," ASTME Paper No. 350, Vol. 61.
- (5) Pearson, J., 1962-3, "Explosive Welding," ASTME Creative Manufacturing Seminars, Paper SP 63-97.
- (6) Hainer, R., 1978, "Automotive Materials Transition: Builders Use More Aluminium," Canadian Machinery and Metalworking, pp. 52~53.
- (7) Wood, W. W., 1963, "Final Report on Sheet Metal Forming Technology," Vol. 1, ASD TDR 63-7-871.
- (8) Ezra, A. A., 1973, "Principles and Practice of Explosive Metal Working," Industrial News Papers, London.
- (9) Crossland, B., 1982, "Explosive Welding of Metals and Its Application," pp. 40, Clarendon Press.
- (10) Mcllelland, H. T. and Otto, H., 1973, Proc. 4th Int. Conf. of the Center for High Energy Rate Forming, University of Denver, Colorado.
- (11) Cowan, C. R. and Holtzman A. H., 1963, "Flow Configuration in Colliding Plates: Explosive Bonding," J. App. Phys., Vol. 34, No. 4, pp. 928~939.
- (12) Bahrani, A. S., and Crossland, B., 1966, "Explosive Cladding", Welding and Metal Fabrication, pp. 252~257.
- (13) Bahrani, A.S. and Crossland, B., 1968, "Explosives and Their Use in Engineering: Part II," Metals and Materials, pp. 68~79.
- (14) Shribman, V., Williams, J. D., Bahrani, A. S., and Crossland, B., 1968, "The Fundamentals of Explosive Welding," IIW Annual Assembly, Group 2, Paper No. 2, Warsaw.
- (15) Du Pont, UK Patent No. 923746.
- (16) Holtzman, A. H., Canadian Patent No. 784458.
- (17) Du Pont, 1980, "Blasters Handbook," 6th Edition.
- (18) Victor Linder, 1973, Theory and Performance of Propellant and Explosive Systems, Department of Defense, USA.