

〈論 文〉

폭발용접에서 부재의 충돌속도에 관한 실험적 연구

문정기* · 김청균**

(1992년 11월 30일 접수)

Experimental Study on the Flyer Velocity in Explosive Welding

Jung-Gi Moon and Chung Kyun Kim

Key Words : Explosive Welding(폭발용접), Flyer Velocity(부재속도), Detonation Velocity(폭
굉속도), Charge Ratio(화약충전비), Stand-Off Distance(이격거리)

Abstract

One of the most important parameters for explosive welding is flyer velocity V_p , which principally depends on momentum caused by detonation of explosive. And close dependency with other parameters such as detonation velocity V_D , dynamic angle β , charge ratio R , flyer thickness t_f and stand-off distance d , should be taken accounts for welding design. This paper describes, as a result of experiment, an empirical equation related to relation between V_p/V_D and R . The flyer velocity which is estimated by $V_p=0.284 \times R^{0.593}$ or $V_p=0.2\sqrt{2E_C} \times R^{0.593}$ can be used in ordinary experiments. And the calculated values of the flyer velocity exhibit better accuracy than those of other investigators.

1. 서 론

폭발에 의한 순간 동적에너지를 이용한 이종재료의 폭발접합은 1962년 Holtzman과 Rudershausen⁽¹⁾에 의하여 연구가 시작된 이래로 접합 메카니즘에 대한 규명이 과학기술자의 관심대상이 되어 왔으며, 이 메카니즘에 대한 해석은 연구자에 따라 접근방법이 달랐다.

Philipchuck⁽²⁾ 등은 용융접합(fusion welding)으로, Davenport⁽³⁾ 등은 마찰접합(friction welding)으로, Otto⁽⁴⁾는 전단효과(shearing action)로 접합현상을 설명하였지만 정설로 받아들이기에는 여러 가지 문제점이 있었다. 그러나 Cowan,⁽⁵⁾ Bahrahi⁽⁶⁾ 및 Crossland^(7,8) 등은 이종재료의 폭발접합이 사각고속충격에 의한 켈트효과에 기인한다고 발표하였

고, 이러한 이론은 실험적으로 증명되어 가는 과정에 있다. 이 켈트효과는 실제적으로 부재(flyer)가 모재(base plate)에 대단히 빠른 속도로 충돌함으로써 발생하고 충돌지점에서의 충격압력은 재료의 전단 강도보다 훨씬 높아 순간적인 시간에서 접촉면의 고체는 비점성유체(invscid flow)와 같이 거동하게 된다. 따라서 여러가지 접합인자중 부재의 충돌속도(flyer velocity: V_p)는 충돌각 β 가 충돌압력을 결정하는데 가장 중요한 역할을 하며, 접합설계에 있어 폭약량의 질량비 R , 폭속 V_D , 부재의 두께 t_f 및 재질, 부재와 모재간의 간격 d 를 결정하는데도 큰 영향을 미치고 있다.

부재의 충돌속도에 관한한 Chadwick⁽⁹⁾은 에너지 평형조건, 기체역학 등의 개념과 화학에 의한 실험을 통하여 폭속에 대한 부재의 속도 즉, V_p/V_D 에 대한 모델을 제안한 바 있으나 폭속계측에 대한 실험상의 정밀도 보증문제로 아직까지는 데이터로서의 사용에는 제한을 받고 있다.

*정회원, 한국기계연구원 에너지·환경제어연구실

**정회원, 홍익대학교 Tribology 연구센터

본 연구에서는 레이저를 사용한 부재의 충돌속도 측정 실험을 통하여 기존 연구자들의 연구 결과를 비교하고, 이 결과를 바탕으로 보다 간단하고 유용한 실험식을 제안하고자 한다.

2. 속도해석모델

폭발용접에서 접합방식의 기본모델은 Fig. 1(a)와 같이 초기 경사각 α 를 갖는 부재위의 폭약이 점화됨과 동시에 A점에서 출발하여 미소시간 Δt 가 경과되었을 때의 접합 진행상태를 보여주고 있다. 접합과정에서 가장 큰 영향을 주고 있는 주요인자는 부재의 충돌속도 V_p , 접합속도 V_c 및 충돌각 β 등이 있다.

Fig. 1(b)는 부재가 순간압력을 받아 모재에 충돌할 때 발생하는 속도 삼각형으로 부재의 모재에 대한 충돌속도, 접합속도, 충돌점 C에 대한 부재의 상대속도의 관계를 기하학적으로 나타낸 모형이다.

이 때 부재의 충돌속도 V_p 의 충돌방향은 다음의 4가지 모델로 분류되어 해석되고 있다. 즉, 각각의 모델에 대한 기하학적 모형과 내용은 Fig. 2(a)~(d)와 같다.

(1) Birkhoff모델⁽¹⁰⁾: 폭발이 일어나기 전후에서

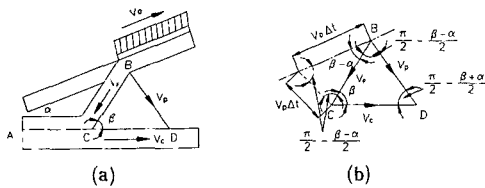


Fig. 1 Geometry of an explosive welding process

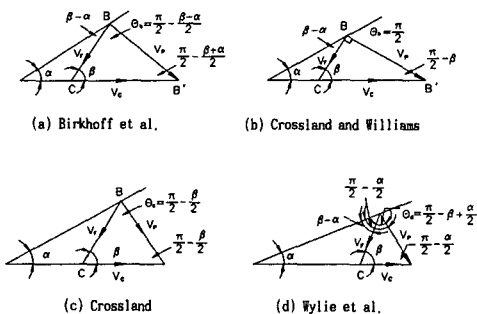


Fig. 2 Velocity diagrams proposed by various investigators

부재와 변형된 부재 사이각을 이등분하는 형태의 모델-(Fig. 2(a))

(2) Crossland-Williams 모델⁽⁷⁾: 폭발용접이 진행 중인 상태에서 V_p 가 부재면에 수직인 경우-(Fig. 2(b))

(3) Crossland모델⁽⁸⁾: V_p 가 충돌지점의 접합속도와 같은 경우-(Fig. 2(c))

(4) Wylie 모델⁽¹¹⁾: V_p 가 초기 경사각을 이등분하는 형태의 모델-(Fig. 2(b))

3. 실험적 연구현황

부재속도의 계산은 전술한 바와 같이 기본적으로는 기하학적인 모형에 의해 해석이 가능하나 정밀하게 보면 정적현상에 의한 것으로 실제적으로는 많은 차이가 발생하게 된다.

지금까지의 실험적 연구는 앞에서의 젯트이론을 기초한 것이다. 즉, 충돌시에 발생된 압력이 전단강도(shear strength)를 훨씬 초과하게 되면 두 금속간에 충돌지점에서 금속이 유체처럼 거동한다는 가설에 근거를 두고 있다. 만일 부재속도가 너무 낮으면 유체거동은 이루어지지 않으며, 또한 유체거동이 없이는 젯트가 발생되지 않기 때문에 따라서 접합은 이루어지지 않는다. 따라서 부재속도의 최저치(minimum value for flyer velocity)의 존재를 인정하지 않으면 안된다.

반대로 부재속도가 너무 높으면 즉, 폭약으로 부터 과다한 에너지가 부재에 가해지게 되는 경우는 두 재료간의 국부적인 용융에 의해 취성의 금속간 화합물(brittle intermetallic compounds)이 과다하게 존재하게 되어 결국 접합강도(bonding force)를 상실하게 되므로 부재 속도의 최대치 또는 상한치(maximum or upper value of flyer velocity)가 존재하게 되며, 이것에 대한 연구는 소위 접합창(weldability window)을 설명하는데 사용되고 있다. (12~14)

폭발접합에서 부재의 역할은 폭약의 폭굉 → 폭굉파 발생 → 에너지의 부재 전달 → 부재의 모재 충돌 → 젯트발생 → 표면 불순물 제거 → 접합의 순간반복 및 연속의 과정 중에서 운동에너지를 전달하고 젯트를 형성하며 자기 자신이 상대에 충돌하여 접착(bonding)하는 일을 담당한다.

Sedikh와 Bondar⁽¹⁵⁾는 파형(wavy form)의 존재를 전제로 하여 $P_{min}=30 \text{ GPa}$ 이라 하고, 표면층

(surface layer)의 유체유사거동에 필요한 최소치를 발표하였으나 $V_D=6$ km/s 이상의 고속폭약에 국한하였으므로 실제 사용에는 제한을 받는다.

Wylie⁽¹⁶⁾는 Sedikh와 Bondar의 연구결과와 유사한 유체역학이론에 의한 켓트를 인정하고, 접촉압력의 최저치가 유체유사거동 이상이어야 한다고 하였다. 또한 부재의 속도가 반드시 운동에너지(kinetic energy)와 종속적인 관계는 아니며 스트레인 값을 도입하고 일정한 이격거리(stand-off distance)가 있어 부재의 충분한 가속에 필요하다 하였으며 $d=2t_f$ 즉, 이격거리를 부재두께의 2배 이상 거리로 제안하였다. 또한 접합경계층 금속간 화합물의 존재에 따라 반사 인장파(reflected tension wave)를 유도하게 되고 결국 접합재료의 분리(spalling)를 일으킨다 하였는바, 고체의 입장에서 접근한 노력이었다고 생각된다.

Deribas⁽¹⁷⁾는 상기의 상한치 만을 다룬 결과이며 물리적 의미로는 부적합한 점이 있고, Wittman^(18,19)은 상대적으로 하한치 만을 대상으로 하였으며, 다음과 같이 소정의 부재의 충돌속도 이상에서는 계면용융이 일어난다는 것을 확인하였다. 즉,

$$V_D = \frac{k_1}{t_f^4 V_c} \quad (1)$$

여기서 t_f 는 부재의 두께이고, k_1 은 Kaye와 Laby⁽²⁰⁾에 의한 체적탄성계수(bulk modulus)이며, V_c 는 접합속도를 말한다.

Loyer⁽¹²⁾는 재료의 경도 H_v 와 밀도의 함수로 V_D 를 표현한 실험식을 다음과 같이 제안하였다.

$$V_D = k_2 \sqrt{\frac{H_v}{\rho}} \quad (2)$$

여기서 k_2 는 상기 Kaye와 Laby에 의한 상수이며, ρ 는 부재의 밀도이다. 이 실험에서 알루미늄/연강의 접합에 있어 상한 에너지는 반드시 모재(이 경우는 연강이 해당됨, 이 실험에서 알루미늄이 모재가 될 수 없는 것도 동시에 확인하였음)의 것에 가깝다고 하였으나 진술한 바와 같이 정적상태의 경도가 충돌당시 동적환경하에서의 상황과 반드시 직접적인 관계가 있느냐 하는 의문에 도달하게 된다.

결론적으로 말하자면 여러 연구자의 실험은 나름대로 접합기구(bonding mechanism)에 대한 이해에 도움을 주고는 있지만 부재속도와 접합특성과의 관계가 완전히 규명되지는 않았다.

4. 충돌속도 계측

위에서 기술한 바와 같이 어떤 경우의 폭발접합이라 할지라도 V_D , V_F , V_C 및 β 에 관한 정보는 불가피하게 필요하게 된다. 이러한 인자는 실제적인 목적에 따라서 부분적으로는 이론적 또는 경험적 데이터에 의하여 충분한 정도를 유지하고 있다고 할 수 있으나, 과정중의 조건이 극한 상태이고 부재가 충돌직전까지 현저하게 가속되고 있는 등의 문제로 인한 경우는 보다 정확한 데이터가 필요하게 된다. 따라서 이러한 인자의 직접 계측방법으로 Dautriche 방식, 와이어-핀(wire-pin) 접촉자방식, 고속카메라 방식, X-레이방식, 속도 프로브(velocity probe)방식, 경사선(slanting wire)방식 등이 사용되어 왔다.

접합과정에서의 부재는 화약으로부터 순간에너지 받아 화약의 폭발방향에 수직이 되는 방향으로 운동을 하게 되고, 이 부재의 속도는 진술한 폭발인자중 가장 중요한 것이지만 반면에 단순한 계산에 의한 추정만 가능하나 거의 무한대에 가까운 화약의 경계조건을 전부 고려할 수 없기 때문에 현실적으로는 직접적인 계측에 의존할 수 밖에 없게 된다.

부재의 충돌속도를 계측하기 위한 실험방법에는 폭약을 사용하는 방식과 총을 사용하는 두가지 방식이 있다. 전자에는 핀(pin) 접촉자 방식을 이용한 Shribman과 Crossland,⁽²¹⁾ 플래시엑스레이(flash X-ray)방식에 의한 Crossland와 Cave,⁽²²⁾ 와이어-핀(wire-pin) 접촉자 방식에 의한 Takizawa,⁽²³⁾ 경사선 방식에 의한 Smith⁽²⁴⁾의 연구가 있고, 본 연구에서 시도한 레이저를 이용한 계측방법이 있다. 후자는 직접폭약의 폭발에 의하지 않고 가스총(gas gun),⁽¹³⁾ 전자총⁽²⁵⁾ 등을 사용하여 금속비산체(metal projectile)를 가스, 전자 또는 전기 에너지를 이용하여 이를 비행시켜 계측하는 방법⁽²⁶⁾이 있다.

폭약사용방식은 주로 부재가 최종속도(terminal velocity)에 도달하는 거리를 계측대상으로 삼고 부재두께와 이 거리와의 관계를 설정하고자 하는 목적이었으며, 이 거리는 통상부재 두께의 1~6배에 해당한다. 반면에 총사용 방식은 부재속도보다는 충돌시의 재료의 거동이나 충돌이후 물성변화를 실험대상으로 하였다. 각 방법마다의 장단점이 있

지만 과정의 초고속 현상론을 감안하여 볼 때 고속 카메라⁽²⁷⁾와 상기 방식중의 하나를 겸용하면 가장 신뢰성있는 데이터가 되리라고 본다.

5. 실험장치 및 방법

본 실험에서 부재의 충돌속도에 관한 실험을 수

행하기 위하여 우선 화약의 폭발속도를 계측하고, 이 속도와 동시 또는 별도로 부재 충돌속도를 계측하였다.

본 실험에서 사용한 주폭약(primary explosive)은 Anfo의 일종인 초안폭약(ammonium Nitrate)으로 화학적 성분과 폭약 특성은 Table 1과 같다. 폭약의 사용밀도는 1.0 g/cm^3 정도이고, 접합은 선

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		
Ammonium nitrate	66.0	Bulk density	0.96~1.05 g/cc
Sodium nitrate	12.0	Strength(R.W.S) by the ballistic test	0.5%
Carbonaceous materials	8.0		
Sodium chloride	6.0	Sensitivity(cap-sensitive)	No.6
Stabilizer	1.0	Theoretical energy	880 cal/g

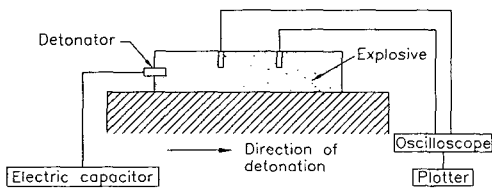


Fig. 3 Measurement of the detonation velocity of the explosive by using velocity probes

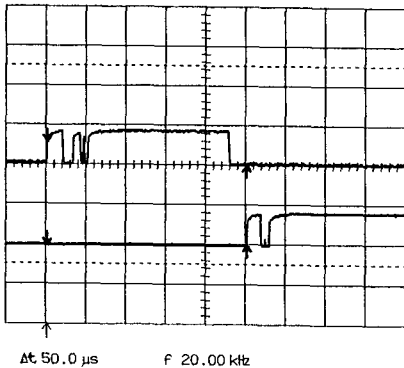


Fig. 4 Record of pulses from the oscilloscope when two wires were used for the measurement of the detonation velocity of the explosive

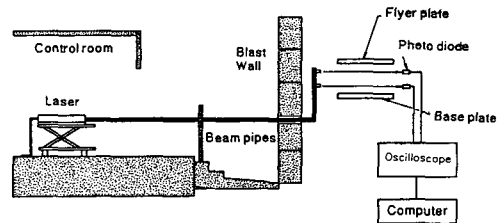


Fig. 5 Laser and welding set-up for measuring the flyer velocity

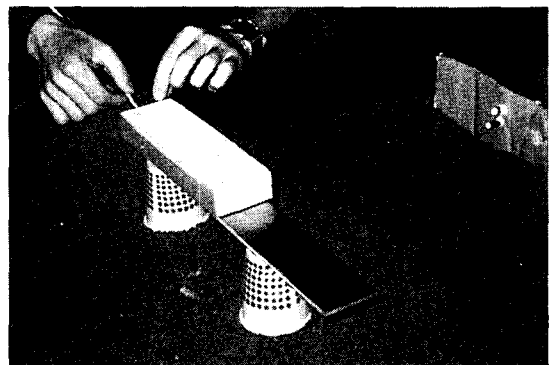


Fig. 6 Photograph of two laser beams installed between the flyer and the base plate; 20 mm apart from each other

형 충격과 발생기구를⁽²⁷⁾ 사용하여 폭발용접을 수행하였다.

화약의 폭굉속도는 진술한 속도 프로브(velocity probe)와 유사한 방법을 채용하였고 Fig. 3과 같이 충전 화약내에 일정한 거리를 두고 구리제 에나멜 선을 삽입하였다. 폭굉속도 계측은 고속 오실로스코프를 사용하여 화약의 폭굉시 절연성이 파괴되는 점을 기록하여 두 점간의 시간과 거리에 의해 산출하였다.

이 때 오실로스코프로부터 기록된 파형의 예는 다음 Fig. 4와 같으며, 실험에 사용된 화약의 밀도 및 두께, 사용뇌관 등을 약간씩 변화시켜서 화약의 폭굉속도는 2100~2800 m/s 정도로 유지하였다.

폭발접합에 사용된 모재는 일반 구조용 강이고, 부재로는 알루미늄 합금 소재를 사용하였으며, 실제 접합에서는 선형 충격과 발생기구를 사용하였다. 부재의 충돌속도 계측은 He-Ne 레이저를 사용하였으며, Fig. 5와 Fig. 6과 같이 외부로 부터 레이저 광을 광섬유로 인입한 다음 부재가 수직방향으로 이동할 때 레이저광 차단효과를 광센서를 이용하여 상기 폭굉속도 계측과 유사한 방법으로 기록하였다. 이 때 부재가 최종속도(terminal velocity)에 도달하는데 소요되는 Willie,⁽¹¹⁾ Smith와 Linse의⁽²⁴⁾ 최소거리와 광학계의 배열상 편의성을 위하여 20 mm 정도의 간격을 두었다. 또한 레이저 빔은 기폭제로 부터 150 mm 지점에 설치하였다.

6. 실험결과 및 고찰

부재의 충돌속도 V_p 는 부재와 폭약의 질량비 R , 폭약의 폭굉속도 V_D , 폭약의 생성 에너지중에서 이용 가능한 에너지 E_A 또는 Gurney 에너지 E_G , 부재의 두께 t_f , 이격거리 d 등에 의하여 영향을 받는 것으로 알려지고 있다. 그러나 충돌속도에 대한 대부분의 해석적 결과식은 질량비 R 에 관한 항으로 간략하게 표현되고 있다.

부재의 충돌속도는 폭약의 폭굉속도와 직접적인 관계가 있고, 폭발접합에서 부재의 충돌속도를 정확하게 예측하는 것이 폭발용접 이론해석시 대단히 중요하다. 이것에 관련되어 폭약과 부재사이의 관계 즉, V_p/V_D 에 관한 기존의 연구결과를 요약하면 표 2와 같다.

이들의 해석결과와 본 연구에서 레이저 계측방식

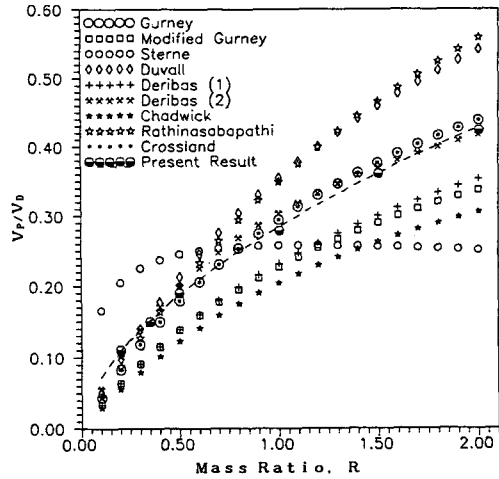


Fig. 7 V_p/V_D as a function of the ratio of explosive mass to flyer mass

Table 2 V_p/V_D equations suggested by various investigators

Analytical Models	Flyer Velocity (V_p/V_D)
Gurney ⁽¹³⁾	$\frac{\sqrt{2E_G}}{V_D} \left[\frac{3}{1 + \frac{5}{R} + \frac{4}{R^2}} \right]^{1/2}$
Modified Gurney ⁽³²⁾	$\phi \frac{\sqrt{2E_G}}{V_D} \left[\frac{3}{1 + \frac{5}{R} + \frac{4}{R^2}} \right]^{1/2}$
Sterne ⁽²⁸⁾	$\frac{\sqrt{2E_G}}{V_D} \left[\frac{5}{1 + \frac{5}{R} + \frac{5}{4R^2}} \right]^{1/2}$
Rathinasabapathi ⁽²⁹⁾	$\frac{\left(1 + \frac{6.4}{16}R\right)^{1/2} - 1}{\left(1 + \frac{6.4}{16}R\right)^{1/2} + 1}$
Crossland ⁽³⁰⁾	$\frac{\sqrt{2E_G}}{V_D} \left[\frac{\left(1 + \frac{2}{R}\right) + 1}{\left(1 + \frac{1}{R}\right)} \cdot \frac{1}{R} \right]^{-1/2}$
Chadwick ⁽³¹⁾	$\frac{0.612R}{2 + R}$
Duval & Erikan ⁽³²⁾	$\frac{4\sqrt{E_G}}{V_D} \left\{ 1 + \frac{27}{16R} \left[1 - \left(1 + \frac{32}{27}R\right)^{1/2} \right] \right\}$
Deribas et al. ⁽³³⁾	(1) $1.2 \frac{\left(1 + \frac{32}{27}R\right)^{1/2} - 1}{\left(1 + \frac{32}{27}R\right)^{1/2} + 1}$ (2) $\frac{3}{4} \left[1 + \frac{2}{R} \left(\frac{R+3}{R+6} \right) \left[1 - \left(1 + \frac{3R(R+6)}{(R+3)^2}\right)^{1/2} \right] \right]$
Present Work	$\frac{\sqrt{2E_G}}{5V_D} R^{0.593}$

을 이용하여 얻은 결과를 비교하면 Fig. 7에서 보여주는 것과 같다. 여기서 사용된 부재의 충돌속도와 폭굉속도 데이터는 Table 3에서 보여주고 있는 것 처럼 수차에 걸쳐서 수행된 실험결과를 평균한

Table 3 Measured mean values of V_p/V_D

No. of Experiment	C/M(R)	V_D (m/s)	V_D (m/s)	V_p/V_D	Mean value of V_p/V_D
1	0.2	231	2100	0.11	0.11
2	0.2	287	2050	0.14	
3	0.2	253	2300	0.10	
4	0.35	329	2350	0.14	0.15
5	0.35	447	2350	0.19	
6	0.35	288	2400	0.12	
7	0.50	475	2500	0.19	0.185
8	0.50	441	2450	0.18	
9	1.00	609	2650	0.23	0.28
10	1.00	874	2650	0.33	
11	1.50	1017	2750	0.37	
12	2.00	1196	2800	0.42	0.42

여 얻은 값이다. 실험에 의한 폭발속도 측정결과는 폭약의 종류 및 배합기술, 측정방법, 접합소재의 종류 등에 따라서 민감하게 차이를 나타내기 때문에 직접적인 비교는 어렵고, 정성적인 비교를 할 수 밖에 없다. 본 실험에서 얻은 결과는 기존의 여타 방법을 이용한 계측방법 결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

비교적 정확한 충돌속도 값을 간단하게 레이저 계측방식을 이용하여 획득한 실험결과를 기초로 Takijawa,⁽²³⁾ Sterne,⁽²⁸⁾ Rathinasabapathi,⁽³²⁾ Crossland,⁽³⁰⁾ 등의 연구에서 고려하였던 에너지 항 $(2E_c)^{1/2}$ 를 삽입하여 부재의 충돌속도 방정식을 구하면 다음과 같이 간단한 식으로 표현할 수 있다.

$$V_p = 0.284 \times R^{0.593} = \frac{\sqrt{2E_c}}{5} \times R^{0.593} \quad (3)$$

여기서 V_p 는 부재의 충돌속도(m/s), R 은 부재의 질량에 대한 화약의 질량비이고, E_c 는 Gurney⁽¹³⁾ 등이 제안한 에너지상수이다. 이 식은 충돌속도를 폭약의 질량비 R 의 항으로 간단하게 표현될 수 있다는 점에서 유용한 식이다.

레이저 측정방식으로 얻어진 실험결과를 기초로 유도된 상기의 실험식은 Table 2에서 표현된

Gurney방정식, Crossland방정식, Deribas방정식(2)와는 비교적 잘 일치하고 있으며, 다른 연구 결과와도 유사한 경향을 보여주고 있기 때문에 제안된 실험식(3)은 폭발용접시 충돌속도를 예측하기 위한 간편한 방정식으로 여타 폭발용접의 해석 및 설계시 대단히 유용한 기초 데이터를 제공하리라 생각된다.

7. 결 론

폭발용접의 접합기구 해석에서 가장 중요한 부재의 충돌속도를 해석하기 위하여 레이저를 이용한 계측실험을 수행하였다.

지금까지 연구자들이 제안한 실험식을 분석하고, 레이저 계측방식을 이용하여 얻어진 결과를 바탕으로 간단한 부재속도 실험식을 유도하였다. 본 연구에서 제안된 부재의 충돌 속도식은 폭발용접 수행시의 충돌속도를 간편하게 해석할 수 있는 유용한 식이라 생각된다.

부재의 운동중에 레이저 광차단 효과를 이용하여 계측된 부재의 충돌속도 측정결과는 기존의 연구결과와 비교적 잘 일치함을 보여주고 있다. 이것은 폭발 용접시의 각종 파라미터를 측정하기 위한 기

존의 여러가지 측정방법중에서 레이저 계측방법이 간단하고, 경제적이라는 점을 고려할 때, 레이저를 이용한 측정방식이 폭발 용접시의 주요인자를 계측하기에 적합하다.

후 기

본 논문은 과학기술처 특정연구사업으로 수행한 연구결과의 일부이다. 실험에 협조하여 주신 한국화약(주), 브리텍 관계자 여러분께 감사드린다.

참고문헌

- (1) Holtzman, A. H. and Rudershansen, C. G., 1962, "Recent Advances in Metal Working with Explosives," Sheet Metal Industries, 39, pp. 399~414.
- (2) Philipchuck, V, and Le Roy Bois, F., 1962, "Explosive Welding," U. S. Patent 3024526.
- (3) Davenport, D. E. and Duvall, G. E., 1961, "Advanced High Energy Rate Forming," Book 1, paper pp. 60~61.
- (4) Otto, H. E., 1972, "Explosive Cladding of Large Steel Plates with Lead," Welding Journal, 51, pp. 467~73.
- (5) Cowan, C. R. and Holtzman, A. H., 1963, "Flow Configuration in Colliding Plates: Explosive Bonding," J. Appl. Phys., Vol. 34, No. 4, pp. 928~936.
- (6) Bahrani, A. S. and Crossland, B., July 1966, "Explosive Cladding," Welding and Metal Fabrication, pp. 252~257.
- (7) Crossland, B. and Williams, J. D., 1970, Metallurgical Reviews, pp. 79~100.
- (8) Crossland, B., 1971, Metals and Materials, pp. 401~413.
- (9) Chadwick, M. D., 1977, "An Assessment of Variable Angle Techniques used to determine Minimum Collision Angle and Impact Velocities for Explosive Welding," 6th Int. Conf., on HERF.
- (10) Birkoff, G., Mcdougall, D. P., Pugh, E. M and Taylor, G. J., 1948, Applied Physics, 9, pp. 563.
- (11) Whlie, E. K., Williams, P. E. G. and Crossland, B., 1971, Proc. 3rd Int. Conf. of the Center for High Energy Rate Forming, University of Denver, Colorado.
- (12) Loyer, A., Taleman, M., Hay, D. R. and Gagnon, G., 1976, "Explosive Welding The Weldability Window for Dissimilar Metals and Alloys," Proc. 3rd Int. Sym. on Use of Explosive Energy in Manufacturing Metallic Materials of New Properties and Possibilities of Application there of in the Chemical Industry, pp. 43~57.
- (13) Szecket, A. and Crossland, B., 1975, "The Design and Development of a 63.5mm Bore Gas Gun for Oblique Impact Experiments and Preliminary Results," Proc. 6th Int. Conf. of High Energy Rate Fabrication, 7.2.1-7.2.15.
- (14) Gurney, R. W., 1943, "The Initial Velocities of Fragments from Bombs," Shells and Strength Characteristics of Welded Joints," Weld. Prod., 10, pp. 1~5.
- (16) Wylie, H. K., Williams, P. E. G. and Crossland, B., 1971, "Further Experimental Investigation of Explosive Welding Parameters," Proc. of 3rd Int. Conf. of the Center for High Energy forming, 1.3.1-1.3.43.
- (17) Deribas, A. A., Simonov, V. A. and Zakcharenko, I. D., 1975, "Investigation of Explosive Welding Parameters for Arbitrary Combinations of Metals and Alloys," Proc. 5th Int. Conf. on High Energy Rate Fabrication.
- (18) Carpenter, S., Wittman, R. H. and Carlson, R. J., 1964, "The Relationship of Explosive Welding Parameters to Material Properties and Geometry Factors," Proc. Int. Conf. of the Center for High Energy Forming, 1.2.1-1.2.23.
- (19) Wittman, R. H., 1973, "The Influence of Collision Parameters on the Strength and Microstructure of and Explosion Welded Aluminium Alloy," Proc. 2nd Sym. on Use of Explosive Energy in Manufacturing Materials of New Properties and Possibilities of Application there of in the Chemical Industry, pp. 153~168.
- (20) Kaye, G. W. C. and Laby, T. H., 1973, Tables of Physical and Chemical Constants and Some Mathematical Functions, Longmans.
- (21) Shribman, V. and Crossland, B., 1969, "An Experimental Investigation of the Velocity of

- the Flyer Plate in Explosive Welding," Proc. 2nd Int. Conf. of the Center for High Energy Forming, 7.3.1-7.3.37.
- (22) Crossland, B. and Cave, J. A., 1975, "The Explosive Properties of Ammonium Nitrate/Fuel Oil Mixtures," Proc. 5th Int. Conf. on High Energy Rate Fabrication, 4.9.1-4.9.11.
- (23) Takizawa, Yu., Izuma, T., Onzawa, T. and Fujita, M., 1975, "An Experimental Study of the Acceleration Zone and the Terminal Velocity of Flyer Plate Driven by Explosives," Proc. 5th Int. Conf. on High Energy Rate Fabrication, 4.18-4.18.42.
- (24) Smith, E. G. and Linse, V. D., 1977, "The Acceleration Characteristics of Explosively Driven Flyer Plates," Presented at the 6th Int. Conf. on High Energy Rate Fabrication.
- (25) Marshall, D. Meyer, 1973, "Impact Welding Using Magnetically Driven Flyer Plates," Proc. 4th Int. Conf. of Center for High Energy Forming, 5.3.1-5.3.23.
- (26) Mackee, F. A. and Crossland, B., 1975, "Further Experiment on the Mechanics of Explosive Welding," 4.11.0-4.11.25.
- (27) 김청균, 문정기, 1992, "폭발용접에서 선형충격파에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제16권, 제6호, pp. 1108~1114.
- (28) Sterne, T. E., 1947, "A Note on the Initial Velocities from Warheades," Report No. 648, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland.
- (29) Rathinasabapathi, M., 1985, Ph. D. thesis, Annamalai University, Annamalaingar, India.
- (30) Crossland, B., 1982, "Explosive Welding of Metals and its Application," Clarendon Press, Oxford U. K.
- (31) Chadwick, M. D., 1968, "Some Aspects of Explosive Welding in Different Geometries," Proc. of the Select Conf. on Explosive Welding, Welding Institute.
- (32) Duvall, G. E. and Erkman, J. O., "Acceleration of Plates by High Explosives," Stanford Research Institute, Report 1, Project No. Gu2426.
- (33) Deribas, A. A., Kudinov, V. M., Matveev F. I. and Simonov, V. A., 1976, "Determination of the Impact Parameters of Flat Plates in Explosive Welding, Combust. Explos. Shock Waves(U.S.S.R.), pp. 182~186.