

〈논 문〉

유한요소법을 이용한 강-티타늄 이종소재의 폭발용접조건 해석

김청균* · 김명구* · 심상한** · 문정기***

(1995년 3월 7일 접수)

On the Explosive Welding Characteristics of Steel-Titanium Dissimilar Materials Using Finite Element Method

Chung Kyun Kim, Myung-Koo Kim, Sang-Han Shim and Jung Gi Moon

Key Words : Explosive Welding (폭발용접), Explosive (폭약), Collision Point (충돌점), Metallic Jet (금속제트), Stand-Off Distance (이격거리)

Abstract

Using the two-dimensional hydrocode HI-DYNA2D, a calculation on the explosive welding of dissimilar plates (Steel/Titanium) was made for the pressure, temperature, velocity and impact angles adjacent to the collision point during the welding process. The FEM result indicates that the optimal stand-off distance of initially parallel set-up is 3~5 mm for various values of the explosive thickness. The calculation shows that when the explosive thickness is around 30 mm, the temperature of welding point which is strongly related to the metallic jet formation is 2,000 ~ 3,500 K for the given stand-off distance.

1. 서 론

폭약을 이용한 이종소재(dissimilar materials)가 공법은 해석상의 제한 또는 폭약 사용시의 안전성 문제로 인하여 커다란 발전을 못하다가 최근에 폭발에너지를 응용한 가공법의 이론적인 해석법과 컴퓨터를 이용한 수치해석법이 발달함에 따라서 폭발에너지를 이용한 기계가공 기술이 활성화되고 있다.⁽¹⁾

폭약이 폭발할 때 발생하는 고압의 충격에너지는 기계소재의 접합, 성형, 절단, 화관 등의 다양한 기계가공법으로 응용되고 있다. 그 중에서도 접합하려는 소재의 물리적 특성이 서로 다른 경우는 여타 접합방법에 비하여 대단히 우수한 접합특성을

나타내는 폭발용접(explosive welding) 기술이 가장 널리 이용되고 있다.

그 동안 폭발용접은 해석상의 어려움 때문에 주로 실험적인 연구에 크게 의존하다가 최근에 컴퓨터와 응용 프로그램의 혁신적인 발달로 수치적 해석기법에 의한 접합현상의 규명이나 실제로 폭발기술 응용을 위한 최적화 설계에 관심이 고조되고 있다.^(2~6)

최근까지는 판재접합에서 가장 중요한 요소인 계면에서의 과형을 유체동역학의 관점에서 고점성(high viscosity)을 갖는 두 유체간의 접촉으로 해석하는 수치해석적 코드를 이용하여 왔으나,⁽⁷⁾ 해석결과와 실제의 폭발용접 사이에는 많은 차이점이 발견되었다. 그 결과 폭발용접에서의 접합기구(bonding mechanism)에 있어 유체역학적 관점보다는 접합계면에서 발생하는 금속제팅(metallic jetting)에 의한 접합이 더 실제적이라는 사실이 실험적으로 규명되면서^(8,9) 과거의 코드보다는 폭약의 폭발 과정 또는 폭발후의 현상을 규명할 수 있는 새로운

*회원, 홍익대학교 트라이블로지 연구센터

**한국중공업(주)

***회원, 한국기계연구원

코드의 개발이 요청되었다. 그러나 이러한 코드 역시 아직은 많은 문제점을 내포하고 있는데, 그 이유는 폭발용접의 특성상 접합과정이 대단히 짧은 시간내에 이루어지기 때문이다.

최근에 와서 많은 연구자들에 의하여 실험적 연구보다는 수치적 해석에 의한 폭발접합의 현상 규명에 상당한 진전을 보여왔다. 특히 그 중에서도 HI-DYNA2D코드⁽¹⁰⁾는 Willkins 모델과 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratories)의 표준모델을 폭발용접의 기본 모델로 채택하여 개발된 것으로 폭발용접을 해석할 수 있으며, 여타의 코드와는 달리 폭약 모듈을 직접 사용함으로써 해석 결과의 신뢰도를 더욱 높였다.

본 논문에서는 LLNL에서 개발한 HI-DYNA2D 코드를 이용하여 강-티타늄 이종소재(steel-titanium dissimilar materials)의 접합조건을 폭약이나 이격거리 조건에 따른 최적화 해석을 수행하고자 하였다.

2. 수치적 해석

폭발용접을 이용한 이종소재에 대한 수치적 해석에서 가장 중요하게 다루어야 될 기본적인 이론은 비선형 접촉-충격(contact-impact)에 관한 이론⁽¹¹⁾이다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 비선형 접촉-충격에 관한 이론을 이용하여 HI-DYNA2D 코드를 사용한 수치적 해석을 주내용으로 하고 있다. 이 프로그램의 주요한 특징으로는 Explicit 시간적분법, Hourglass 해석법, Penalty 기법을 이용한 접촉문제의 해석방법이다.⁽¹²⁾

Table 1 Hourglass base vector

	j=1	j=2	j=3	j=4
Γ_{j1}	1	1	1	1
Γ_{j2}	-1	1	-1	-1
Γ_{j3}	1	-1	-1	1
Γ_{j4}	-1	-1	1	-1
Γ_{j5}	1	-1	-1	-1
Γ_{j6}	-1	-1	1	1
Γ_{j7}	1	1	1	-1
Γ_{j8}	-1	1	-1	1

여기서, HI-DYNA2D는 계산시간을 절약하기 위한 1점 적분방식을 사용하였는데, 이것은 실제로 에너지를 소비하지 않는 변형 절점을 만들 우려가 있으므로 Hourglass 기법을 동시에 적용하였다. Hourglass 기법 사용시의 기본벡터(base vector)는 Table 1에서 주어지고, 여기서 Γ 는 Gruneisen 상수를 나타낸다.

폭발용접을 해석하기 위한 선처리와 후처리 프로그램으로는 MAZE와 ORION을 각각 사용하였다. 폭발용접의 접합조건을 해석하기 위한 모델은 Fig. 1과 같이 부재와 모재가 서로 평행하게 유지한 상태에서 좌측으로부터 접합이 진행되는 방식을 채택하였다.

Fig. 2는 HI-DYNA2D를 이용한 폭발용접의 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 유한요소망을 보여주고 있

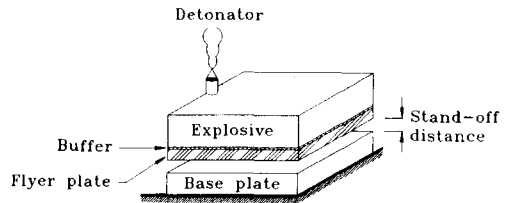


Fig. 1 Parallel arrangement for explosive welding

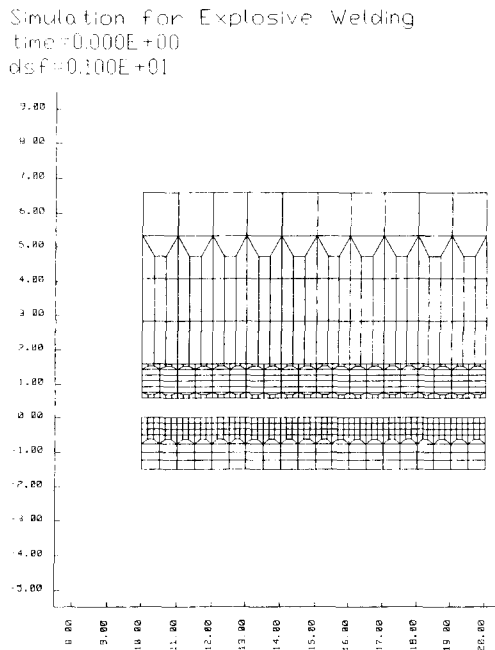


Fig. 2 Mesh generation for the computer simulation

는데, 670개의 축대칭 4각형 요소(4-node quadrilateral element)와 810개의 요소절점으로 구성 되어 있다. 수치해석을 위한 유한요소는 부재쪽에서 수평방향으로의 바이어스 메쉬비(biased mesh ratio)는 27 : 1이고, 모재쪽에서는 3 : 1로 하였다. 또한 수직방향으로는 4 : 1~2 : 1로 하여 해석과정상 가장 적합한 비율을 채택하였다.

폭발용접의 수치적 해석을 위한 폭약과 폭접소재에 대한 경계조건은 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 폭약이 기폭한 후 폭약과 부재 사이에는 상대적인 미끄럼 마찰이 없고, 단지 부재에 압력만을 가한다.

(2) 폭약과 모재의 좌우측과 상부는 자유경계면으로 설정한다.

(3) 모재의 상부와 부재의 하부 사이, 즉 계면 사이에서는 가속이 일어난 이후의 마찰접촉을 고려하였다.

(4) 모재의 하부는 자유경계면으로 표시됨으로써 압력이 하향되었다가 다시 반향되어 오는 충격파가 없다고 가정한다. 이것은 실제의 폭발용접에서 지지대로 모래바닥을 설정함으로써 충격파가 흡수되는 현상을 근사하게 나타낼 수 있다.

본 연구에서 유한요소법을 이용한 폭발용접용 폭접소재와 폭약에 대한 물성치는 Table 2와 Table 3에서 각각 주어진다.

Table 2 Material data for explosive cladding plates

Properties	Materials	Base plate (Steel)	Flyer plate (Titanium)
Density, g/cm ³		7.896	4.528
Shear modulus, kg _f /cm ²		0.77	0.434
Yield strength, kg _f /cm ²		3.4 × 10 ⁻³	7.1 × 10 ⁻³
Effective plastic strain		3.0	3.0

Table 3 Detonation properties of the explosive

Properties	Explosive	PETN
Density, g/cm ³		1.77
Detonation velocity, cm/μs		0.83
Chapman-Jouget pressure, Mbar		0.335

3. 폭약특성

본 연구에서 사용한 초안폭약인 PETN은 폭발시 일정한 크기의 폭굉파(detonation wave)를 형성하여 진행하다가 소멸될 때까지 비교적 균일하게 폭굉특성을 유지한다고 가정한다. 폭약의 폭굉에 대한 화학적 반응상태를 에너지의 관계로 나타내면, 폭굉시 폭약내의 압력은 압력-체적-에너지의 관계로 나타내는 JWL(Johnes-Wilkins-Lee) 방정식^(10,13)으로 표현될 수 있다. 즉,

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v} \right) e^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v} \right) e^{-R_2 v} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

여기서, A , B , R_1 , R_2 는 폭약의 특성에 따라서 결정되는 실험상수, $\omega = \beta^{-1} = \Gamma$ (Gruneisen 상수), V 는 폭약이 폭굉된 이후의 체적과 폭굉전의 체적비(= v/v_0), P 는 폭발압력, E 는 단위 체적당의 폭굉 에너지를 각각 나타낸다.

4. 폭굉압력

폭발용접에 사용되는 모재와 부재의 재질은 일반적으로 비선형 응력-변형률 관계를 나타내는 탄소성 재질이다. 본 연구에서 사용한 이중재료로 선정된 강재(steel : SM45C)와 티타늄(titanium)의 재질은 등방성이고, 평면 변형률(plane strain)에 따라서 변한다고 가정하면 폭발압력은 Gruneisen의 상태방정식으로 표현될 수 있다.^(10,13)

재료에 전달되는 폭약의 폭발 충격파가 일차원 단열 압축상태로 전파된다고 가정할 경우 폭굉파 선단(shock wave front)의 후면에 존재하는 폭발물질의 충격파 속도 D , 단위질량당 폭발물질의 내부 에너지비 e 는 다음의 Gruneisen 상태방정식에 의하여 정의된다.⁽¹⁾

$$D = \frac{\rho(V_D - u)}{\rho_0} = \frac{v_0}{v}(V_D - u) \quad (2)$$

$$e - e_0 = \frac{1}{2} \rho_0 D u (v_0 - v) \quad (3)$$

여기서, ρ 는 폭약의 밀도, V_D 는 폭약의 폭굉속도, u 는 폭굉파 후면에 존재하는 폭발물질의 이동속도, $v = 1/\rho$ 는 비체적을 각각 나타내고, 첨자 0 는 초기상태를 의미한다.

또한 폭약의 폭굉파 전달에 의하여 폭접소재 내부에서 발생하는 압력 P' 는 2차원의 열맥동에너지 (thermal harmonic oscillation energy) e_t 와 Gruneisen 상수 Γ 를 적용하면 Mie-Gruneisen⁽¹⁾ 상태방정식은 다음의 식으로 주어진다. 즉,

$$P' = P_x(v) + \frac{\Gamma}{v} e_t \quad (4)$$

여기서, P_x 는 재료의 비체적에 관련된 값으로 입자간의 쿨롱력(Coulomb force)과 외부의 압축력에 대한 양자의 반발력을 의미하고, Gruneisen 상수 Γ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Gamma = v \left(\frac{\partial P}{\partial e_t} \right) \quad (5)$$

5. 결과 및 고찰

본 연구에서 이종소재의 폭발용접조건을 해석하기 위한 그림의 결과에서 별다른 단위가 제시되지 않는 한 수평축은 접합이 일어나는 진행방향의 크기(mm)를 나타내고, 수직축 방향은 시험편의 시뮬레이션을 위한 기하학적 수치(mm)를 나타내는 것으로 커다란 의미를 부여하지는 않는다.

Fig. 2의 유한요소망에서 보여주는 것처럼 사용된 폭접소재의 크기는 단위폭당의 길이가 100 mm이고, 소재두께는 모재가 20 mm, 부재는 10 mm를 각각 나타낸다. 폭약의 양은 폭접소재의 길이와 같

은 100 mm이고, 폭약의 두께는 10, 20, 30, 40, 50 mm이며, 이들 데이터를 기초로 폭접소재의 접합조건을 도출하기 위한 수치적 해석을 수행하였다.

Figs. 3~5는 폭약이 폭발되어 폭굉파가 완전히 형성되었을 때, 즉 폭약이 기폭된후 18 μ s 지난 접합 진행과정중에 접촉점 부근에서 발달된 폭발압력, 폭접소재내의 온도분포와 속도분포를 각각 보여주고 있다. 이들의 계산결과에 의하면 접촉점(welding point), 즉 실제로 접합이 일어나는 지점

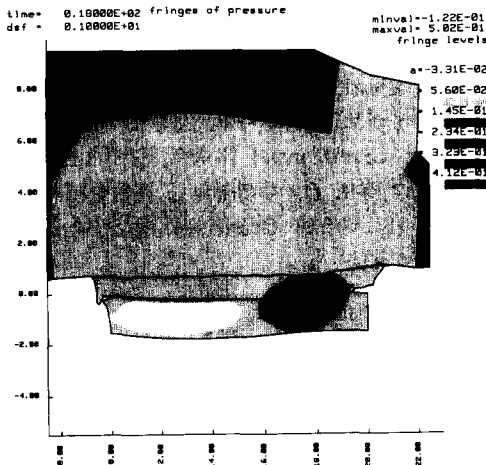


Fig. 3 Pressure distributions of dissimilar plates by the explosive welding technique in the contact zone

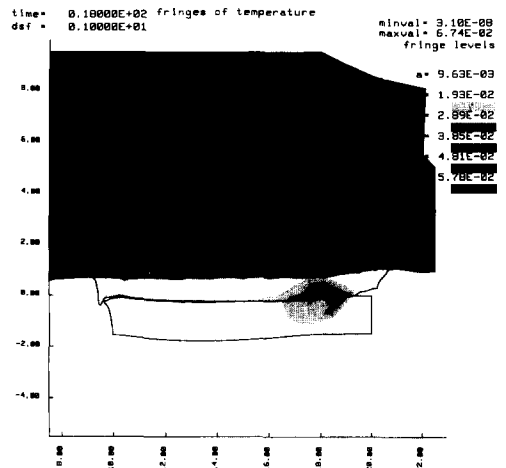


Fig. 4 Temperature distributions of dissimilar plates by the explosive welding technique in the contact zone

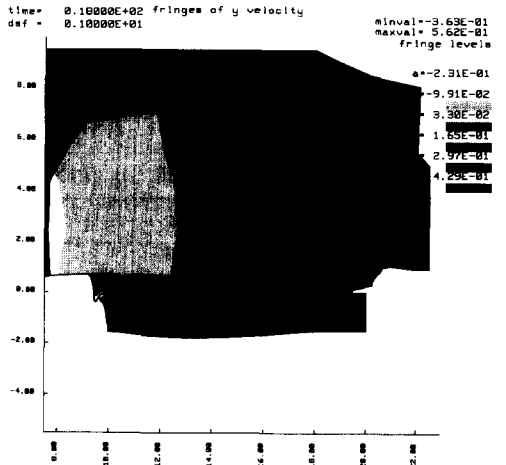


Fig. 5 Velocity distributions of dissimilar plates by the explosive welding technique in the contact zone

은 부재와 모재가 폭굉파에 의하여 최초로 접촉 (initial contact)이 일어나는 지점보다 약간 뒤쪽에서 일어났고, 이들 지점에서의 접합응력, 온도, 속도 등의 물리적 특성은 대단히 높게 나타났다. 이것은 부재가 모재에 최초로 접촉이 일어나는 지점보다 약간 뒤에서 용접이 진행된다는 것을 의미하는 것으로 기존의 연구와 대단히 유사한 결과를 보여준다.⁽³⁾ 즉, St/Ti 이종재질의 폭발접합에서 최대압력 412 Kbar이 발생하는 지점에서의 순간섬광 온도(flash temperature)는 57,800 K, 최대이동속도는 4,290 m/s로 각각 계산되었다.

이들의 유한요소해석 결과를 바탕으로 여러가지의 이격거리(stand-off distance), 즉 $s/d=2, 3, 4, 5, 6$ mm에 대하여 수치적 해석을 수행한 결과를 Figs. 6~8에서 보여주고 있다. 해석결과에 의하면 폭굉부재의 두께가 일정한 상태에서 폭약의 두께가 증가할 수록 압력, 온도, 접촉점의 속도가 증가하고, 이들의 결과는 일반적으로 수렴하는 결과를 보여주고 있다. 이것은 폭발용접에서 폭약설계시 필요한 최소한의 폭약두께(critical explosive thickness)가 존재한다는 것을 의미한다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 폭약의 양을 증가시키기에 따라서 일반적으로 초기의 접촉점(contacting point)에서의 압력이나 온도가 증가되나, 폭약의 두께가 40~50 mm 이상이 됨에도 불구하고 접촉점에서의 접촉압력과 온도가 일정해지는 경향을 보여준다. 이것은 폭약의 양을 과도하게 많이 사용한다고 좋

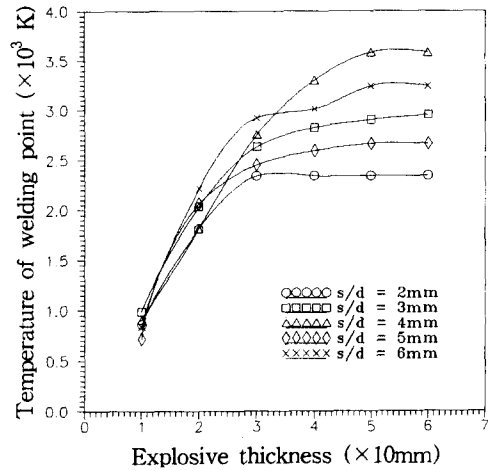


Fig. 7 Maximum temperature as a function of the explosive thickness around the collision point during the explosive welding process

은 접합결과를 얻는다는 것을 의미하는 것은 아니다.

Fig. 7은 여러가지의 이격거리 s/d 에 대하여 접합점에서 발생하는 순간적인 충돌점의 온도를 계산한 것으로 폭약의 두께가 30 mm 이상되면 온도가 2,000~3,500 K를 보여주는데, 이것은 폭약의 두께나 이격거리가 어느 한계값 이상으로 유지되어야 충분한 접합조건을 얻을 수 있다는 계산결과를 나타내고 있다. 여기서, 계산된 결과, 즉 2,000 K 이상의 온도는 순간 초고압하에서 발생 가능한 췌

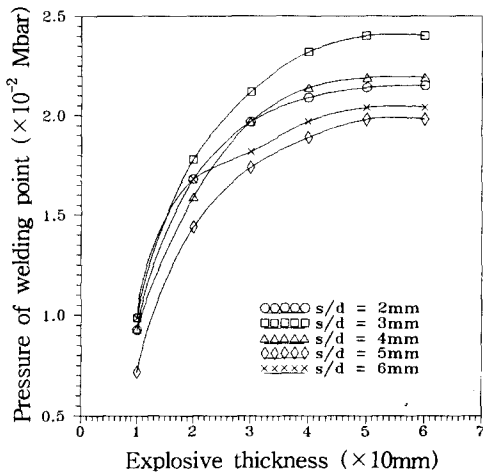


Fig. 6 Maximum pressure as a function of the explosive thickness around the collision point during the explosive welding process

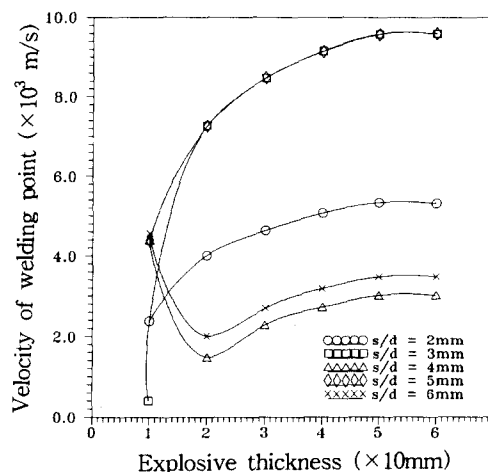


Fig. 8 Maximum velocity as a function of the explosive thickness around the collision point during the explosive welding process

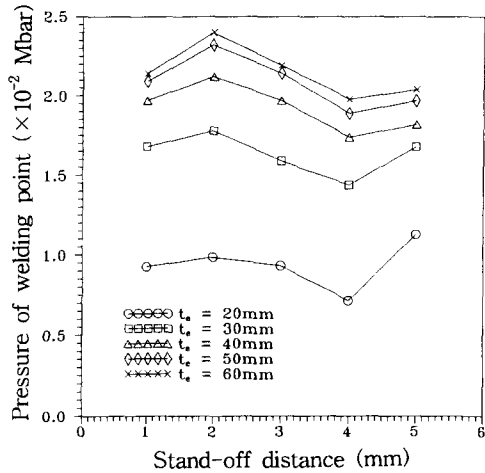


Fig. 9 Maximum pressure as a function of the stand-off distance

팅현상을 설명할 수 있는 충분한 온도로 생각된다.

또한 용접설계시 가장 중요한 모재와 부재 사이의 이격거리는 폭발용접 특성에 커다란 영향을 주고 있고 있는데, 이와 같은 결과를 뒷받침해 줄 수 있는 결과가 Fig. 9에서 제시하고 있다. 본 연구의 수치적 해석결과에 의하면 강재-티타늄에 대한 주어진 접합조건에서 부재와 모재 사이의 이격거리는 약 3~5 mm 정도가 되어야 접합지점의 압력이 안정화를 보여주므로 좋은 결과를 기대할 수 있다. 이것은 폭발접합의 최적화를 위한 기존의 실험적 결과치와 잘 일치하는 연구결과이다.⁽¹⁴⁾ 폭발접합에 관한 기존의 실험적 연구결과는 일반적으로 이격거리가 너무 작으면 접합조건이 불안정해져 접합이 안되고, 너무 크게 되면 접합이 안되고 충격력만이 가해지는 상태가 되므로 이 또한 접합이 안되는 것으로 알려져 있다. Fig. 9에서 제시되는 해석결과는 이러한 실험적 해석을 수치적으로 용이하게 제시할 수 있다는 측면에서 그 의미를 갖는다.

폭발용접 설계시 고려되어야할 충돌각(impact angle)은 이격거리, 접합소재의 치수와 특성, 폭약의 양 등에 관련된 주요한 파라미터이나, 접합과정 중의 충돌각을 이론적 해석이나 실험적 방법을 통한 데이터를 얻기가 대단히 어려운 문제였다. 그래서 본 연구에서 Kury와 Wittman이 제안한 해석모델⁽¹⁴⁾을 기초로 계산한 유한요소 해석 결과와 Sobsky⁽¹⁴⁾의 실험적 결과를 비교한 부재의 충돌각은 비교적 잘 일치하는 경향을 Fig. 10에서 보여주

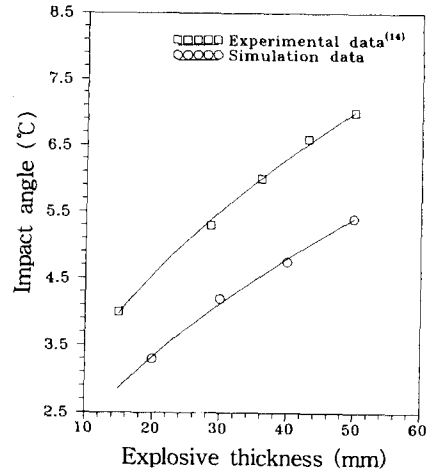


Fig. 10 Compared results of impact angle as a function of the explosive thickness

고 있다. 폭약의 두께를 변화시켜도 접합점에서의 충돌각이 비교적 직선적으로 변하며, 폭약의 양에 따라서 다르기는 하지만 폭약의 두께변화에 대하여 충돌각은 전반적으로 약 1~1.5° 이내의 미소한 차이를 보여주고 있다.

6. 결론

폭약의 폭발시 발생하는 초고압 충격 에너지파를 이용한 강-티타늄 이종재질의 폭발접합 특성을 유한요소기법에 의하여 실험적인 방법으로는 해석하기 어려운 미시적 관점의 접합조건을 해석하였다. 서로 다른 이종재질간의 접합에서 HI-DYNA2D 유한요소 코드를 이용한 계산결과에 의하면 충돌점 부근에서의 압력크기는 기존에 수행하였던 Oberg 등⁽³⁾의 수치적 해석결과와 잘 일치하고 있다.

한편, 폭약이 정상적인 폭광에너지를 발생시키기 위해서는 폭약이 30 mm 이상의 두께를 유지하여야 하며, 50 mm 이상의 폭약두께는 폭접소재의 접합에 별다른 영향을 주지 못하고 있다. 즉, 폭약을 적게 사용하면 접합에너지가 부족하여 접합이 안되고, 폭약이 과도하게 많게 되면 폭약의 손실이 예상되므로 폭발용접 설계시 이들의 양을 미리 정확하게 예측하는 것이 대단히 중요함을 제시하였다. 또한 평행한 상태에서 강-티타늄 이종소재를 접합할 경우의 이격거리는 3~5 mm로 유지하는 것이 가장 양호한 접합상태를 얻을 수 있는 것으로 해석되

었다.

본 연구에서는 폭발용접의 접합특성 해석과 이에 따른 강-티타늄 이종소재의 접합 설계조건을 실험적인 방법으로 구하지 않고, HI-DYNA2D 코드를 이용한 반복작업을 통하여 접합조건 설계데이터를 충분히 얻을 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Lawrence, E. M., 1988, *Shock Waves for Industrial Applications*, Noyes Publications.
- (2) Botros, K. K. and Groves, T. K., July 1980, "Fundamental Impact Welding Parameters-An Experimental Investigation Using a 76 mm Powder Cannon," *J. Appl. Phys.*, Vol. 25, pp. 3706~3714.
- (3) Oberg, A., Schweitz, J. A. and Olofsson, H., 1984, "Computer Modelling of the Explosive Welding Process," *Proc. of the 8th Int. Conf. on HERF*, pp. 75~84.
- (4) Merzhiersky, L. A. and Resnyansky, A. D., 1985, "Dislocation Structure in the Models of Dynamic Deformation and Fracture of Metals," *Journal de Physique*, pp. C5-67~72.
- (5) Gupta, R. C. and Kainth, G. S., 1990, "Swing Wake Mechanism for Interface Wave Generation in Explosive Welding of Metals," *J. Appl. Mech.*, Vol. 57, pp. 514~521.
- (6) 김청균, 김명구, 문정기, 손원호, 1993, "이종 재료의 폭발용접특성 해석에 관한 컴퓨터 시뮬레이션," 대한기계학회논문집, 제17권, 제12호, pp. 3028~3044.
- (7) Hancock, S. L., 1976, *Finite Difference Equations for PISCES 2D ELK*, Physics Int. Co., California, TCAM 76-2.
- (8) Harlow, F. H. and Pract, W. E., 1966, "Formation and Penetration of High Speed Collapse Jets," *Physics Fluids*, Vol. 9, pp. 1951~1959.
- (9) Botros, K. K. and Groves, T. K., 1981, "Potential Wave Formation in Impact Welding," *Philosophical Magazine*, Vol. 131, pp. 587~597.
- (10) Hallquist, J. O., 1984, "User's Manual for DYNA2D," Jan., *Lawrence Livermore National Laboratories, Report UCID-18756*.
- (11) Hallquist, J. O., 1990, "A Procedure for the Solution of Finite-Deformation Contact-Impact Problems by the Finite Element Method," University of California, Lawrence Livermore National Laboratories.
- (12) Hallquist, J. O., 1989, "Theoretical Manual for DYNA3D," University of California, Lawrence Livermore National Laboratories.
- (13) Bulson, P. S., 1989, *Structures under Shock and Impact*, July, Computational Mechanics Publications.
- (14) Blazynski, T. Z., 1983, *Explosive Welding, Forming and Compaction*, Applied Science Publishers.