

〈論 文〉

이종재료의 폭발용접특성 해석에 관한 컴퓨터 시뮬레이션

김청균* · 김명구* · 문정기** · 손원호***

(1993년 4월 19일 접수)

Computer Simulation on the Explosive Welding Characteristics of Dissimilar Materials

Chung Kyun Kim, Myung-Koo Kim, Jung-Gi Moon and Won-Ho Son

Key Words : Explosive Welding(폭발용접), Dissimilar Material(이종재질), Metallic Jet(금속 제트), Jet Instability Criteria(제트 불안정 임계점), Wave Surface(파면)

Abstract

A metallic bond of great strength for the same or dissimilar metals can be produced by the explosive welding. The formation of a metallic jet at the interface between the two impacting plates has been simulated using the numerical hydrocode DYNA2D. The mechanism of explosive welding for the wave formation is also analyzed by the computer simulation technique. The microscopic observations for the metallic jet and wave formations are shown to be in good agreement with the experimentally observed behaviour of the explosive welding. The computer simulations of the explosive welding process have proven especially useful for analyzing the mechanism of metallic bonds

1. 서 론

접합계면에 접합재질을 사용하지 않은 상태에서 단지 폭약이 폭발할 때 발생하는 순간 팽창에너지를 이용하여 이종 또는 동종 판재간의 접합이나 열교환기의 관용접(tube welding) 등에서 특수하게 사용되는 접합방법을 폭발용접(explosive welding)이라 한다. 폭발용접은 접합소재 계면간의 동적인 상호접합작용이 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 초⁽¹⁾ 이내의 상태에서 이루어지기 때문에 실험적인 해석방법으로는 결과적인 규명에 불과했고, 기존에 제시되었던 여러가지

해석모델들은 명확하게 증명되지 않았기 때문에 수학적모델을 정립하기에 어려움을 겪고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 이종재질(dissimilar materials)간의 접합 메카니즘을 소재가 접합계면에서 순간 극압을 받아 국부적으로 균일한 비압축성 유체로 간주한 제트현상에 의한 유동해석방법을 이용하여 접근하려는 연구가 있었고,^(2~5) 최근에는 컴퓨터 및 프로그램의 발전에 힘입어 단편적이거나 제트의 발생을 수치적으로 규명하려는 노력이 시도되고 있다.^(6~8) 폭발용접에서 제트가 발생하게 되면 부재와 모재사이의 계면에 붙어있는 각종 슬러그나 이물질 등이 제거된 깨끗한 원소재면(virgin surface)이 노출되기 때문에 두 재질간의 고용체접합(solid state welding)이 완벽하게 이루어지므로 여타 방식에 비하여 접합강도가 대단히

*정회원, 홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

**정회원, 한국기계연구원 에너지·환경제어연구실

***정회원, 국방과학연구소

높게 된다.

폭발용접에서 컴퓨터 시뮬레이션 해석방법은 접합소재의 접합특성을 간단하게 해석하여 실험 설계 조건을 결정할 수 있다. 비록 수치적인 모델 해석 방법이 초기적인 단계에 머물러 있기는 하지만 폭발용접에서 해석하기가 대단히 어려운 접합 메카니즘을 추정아닌 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 해석할 수 있다는 가능성은 대단히 중요하다. 특히 실험적으로는 접합의 중간과정을 해석한다는 것이 현재까지는 곤란하기 때문에 적절한 프로그램을 개발하여 실제 폭발접합에 적합한 모델을 설정하는 것은 커다란 의미를 갖는다.

본 연구에서는 폭발에너지를 이용한 이중재료의 접합 메카니즘에서 가장 중요한 역할을 하는 충돌 접합점 부근에서 표면용기현상, 즉 파도형상(wave formation)의 생성, 제트(jet)의 발생과 성장에 대한 접합과정을 컴퓨터 시뮬레이션 해석기법을 통하여 분석하고, 또한 순간 접촉계면에서의 물리적 접합특성 변화를 해석하고자 한다.

2. 수치적 해석

폭발용접의 해석모델 형태는 부재와 모재가 Fig. 1과 같이 서로 평행면 상태에서 일정한 이격거리(stand-off distance)를 유지한 경우에 대하여 폭발 접합 특성을 컴퓨터 시뮬레이션방법으로 해석하였다.

폭발용접에 대한 전용 프로그램이 아직 개발되지 않았기 때문에 정확히 접합 메카니즘에 대한 규명은 어렵지만 PISCES 2D ELK[®]의 연속체 해석용 프로그램이나 SWE2D¹⁰⁾와 같은 Lagrange 유한차분코드를 사용하여 해석하려는 연구가 시도되고 있다. 미국 LLNL(lawrence livermore national lab.)에서 개발하여 동적하중을 받는 구조물의 변형률 해석, 폭발에너지에 의한 충돌물체의 탄소성 해석 등에서 널리 사용되고 있는 유한요소코드 DYNA2D¹¹⁾를 이용하여 폭발용접의 제트현상, 제

면에서의 파형에 관한 고찰을 수행하였다. 폭발용접의 기하학적 치수, 폭발의 화학적 성질과 물리적 특성에 관한 자료, 소재와 지지대의 재질특성에 관한 데이터 등은 선처리 프로그램(preprocessor)으로 사용한 MAZE의 입력 파라미터로 제공되었다. 또한 결과를 출력하기 위하여 사용된 ORION 프로그램은 충돌점 부근의 압력, 응력, 제트와 파형 등에 관한 각종 정보를 다양하게 출력하였다.

유한요소코드인 DYNA2D를 이용하여 Fig. 1과 같은 접합소재에 대한 폭발용접 모델해석에서 프로그램 특성상 메쉬는 4각형으로 분할하였고, 부재와 모재사이의 접합계면에서는 Fig. 2에서 보여주는 것과 같이 수평방향으로 부재쪽에서는 바이어스 메쉬비(biased mesh ratio)가 27 : 1이고, 모재쪽에서는 3 : 1로 나누었다. 또한 수직방향으로는 4 : 1 ~ 2 : 1로 해석하는 것이 가장 적합하였다.

고폭약 압력은 DYNA2D¹¹⁾의 JWL 상태 방정식을 사용하였고, 폭발소재에 대한 충격압력은 Gruneisen 상태 방정식을 이용하여 수치적 해석을 수행하였다. 경계조건은 Table 1에서 제시한 것을 사용하였고, 그 외의 입력 데이터는 Table 1에서 사용된 데이터에 따라서 DYNA2D 프로그램에서 제시하는 특성치 데이터를 활용하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 토의

폭발용접의 접합 메카니즘을 수치적인 방법으로 해석하기 위하여 사용된 기본 모델은 Fig. 2와 같은 초기 배열로부터 폭발의 폭발에너지가 부재에 가해지면서 접합이 진행되는 중간모형을 Fig. 3과 같은 모델로 해석되고 있다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 시험편의 일반적인 설계 치수 및 실험 데이터는 Table 1에서 주어진다. 이들 그림에서 수평축과 수직축은 시험편의 크기(단위 : mm)를

Table 1 Data for the computer simulation

Basic Parameters	Values
Flyer plate thickness, mm	6.6
Base plate thickness, mm	20
Explosive thickness, mm	23.9
Explosive density, g/cm ³	0.9~1.1
Detonation velocity, m/s	1500

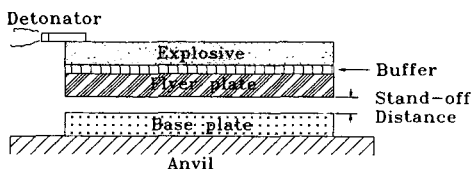


Fig. 1 General view of two initially parallel plates

Test for Explosive Welding
 dsf = 0.100E+01
 time = 0.000E+00

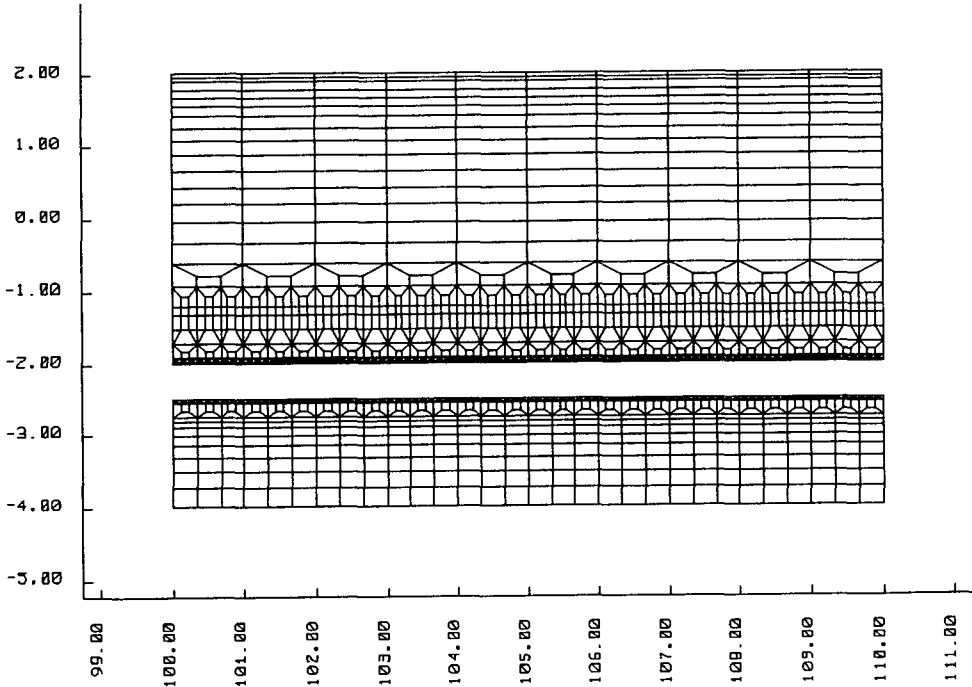


Fig. 2 Mesh generation for the computer simulation of explosive welding

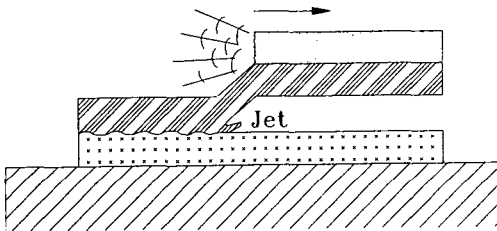


Fig. 3 Mode of collapse of the explosive welding process

각각 나타낸다.

접합특성을 해석하기 위하여 사용된 이중재질은 알루미늄재/강재이고, 시뮬레이션 해석 및 실험적 연구에 사용된 화약은 고성능 초안폭약이다.

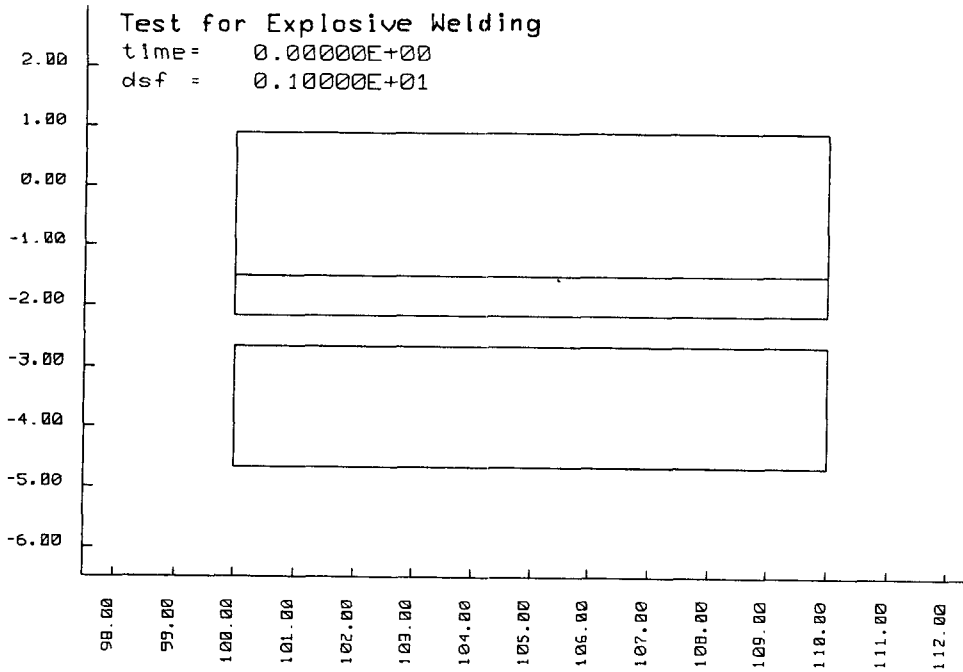
폭발용접 시뮬레이션시 가장 중요한 경계조건은 모재의 한쪽면을 바닥면에 지지하는 것으로 구속해야 하고, 폭약의 폭평파 전파형태는 선기폭을 채택하여 균일한 접합에너지를 공급할 수 있도록 하였으며, 폭약이 부재에 그리고 부재가 모재에 접합하

면서 에너지를 전달할 수 있도록 접합소재간의 접합조건을 지정하는 것이 필요하다.

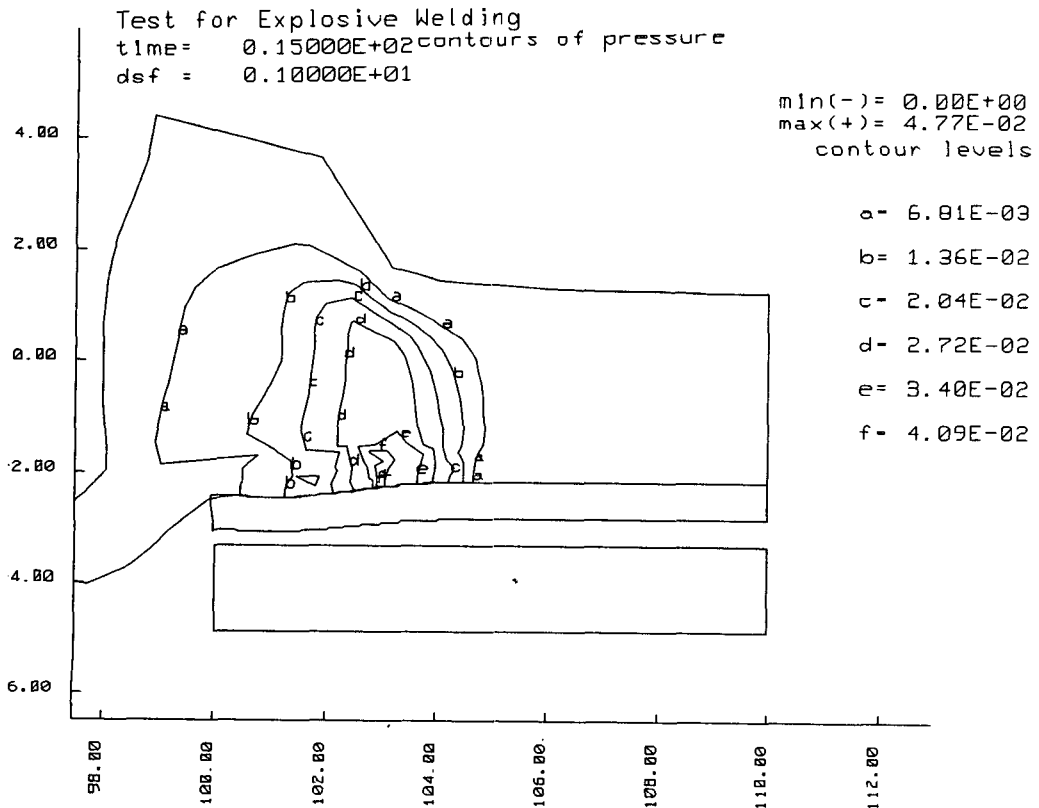
3.1 접합특성 해석

이중재질의 접합특성을 해석하기 위한 그림의 결과에서 다른 단위가 제시되지 않는 한 수평축은 접합의 진행방향의 크기(mm)를 나타내고, 수직축은 화약이 폭발할 때 발생하는 폭압의 크기(Mbar)를 표시한다.

Fig. 4(a)는 이중재질간의 폭발용접을 수행하기 위하여 평행하게 설치한 소재와 폭약의 배열형태를 보여주고 있고, Fig. 4(b)는 폭약을 기폭한 후 15 μ s 지난 상태에서 계면의 접합진행 과정을 나타내고 있으며, Fig. 4(d)는 계면에서의 제트가 발생된 상태에서 폭약의 선단파가 전파되고 있는 일반적인 진행형태를 보여주고 있다. 이들 그림에 의하면 폭평 선단파는 충돌접합점의 이동속도 보다 약간 앞서서 전파되고 있으며, 팽창된 폭평가스는 이미 접합이 이루어진 부재위를 계속적으로 고압으로 누르



(a) 0 μ s



(b) 15 μ s

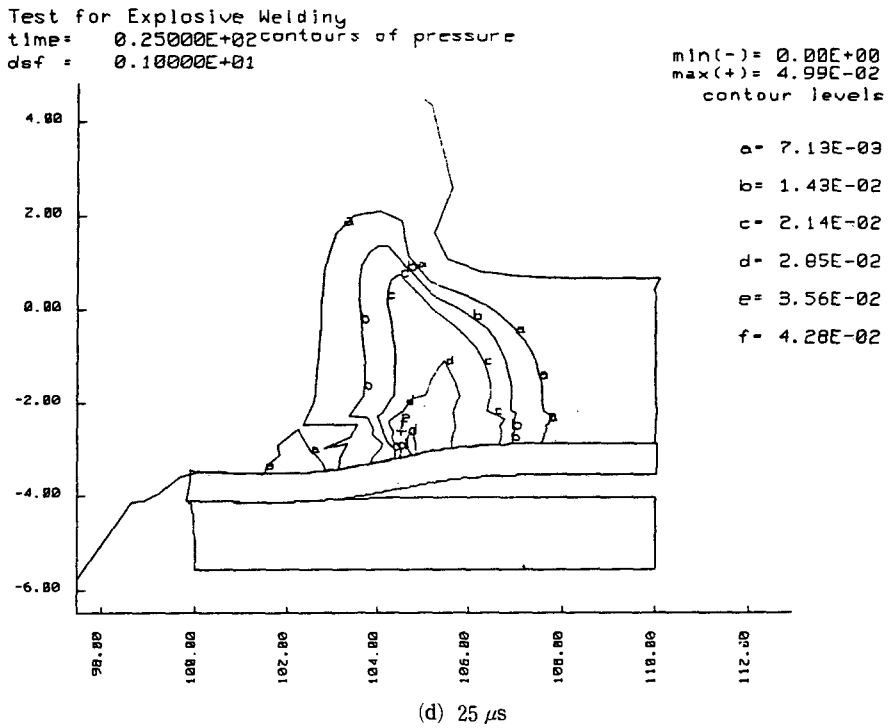
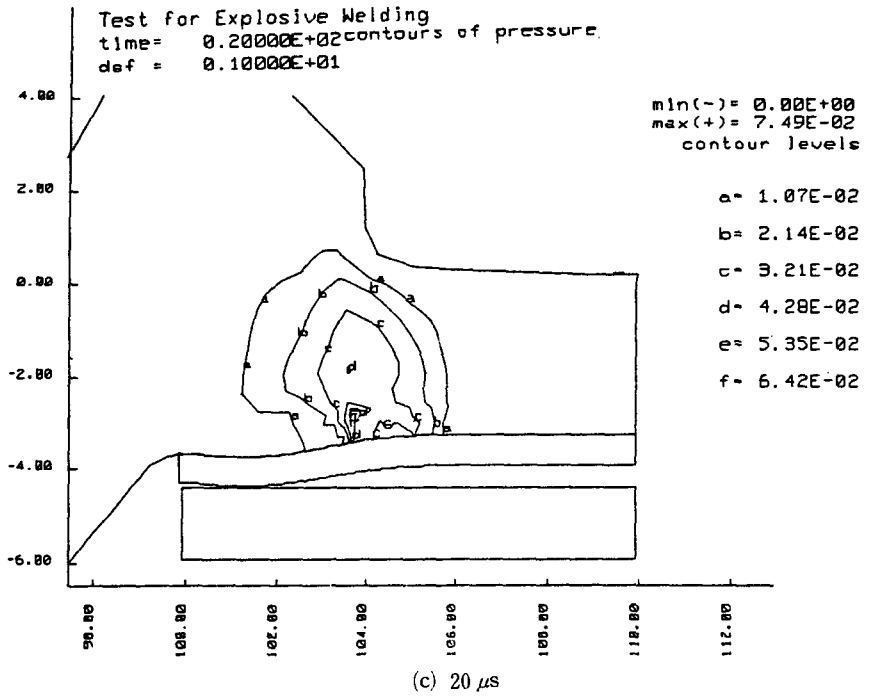


Fig. 4 Computer simulated deformation pattern of the explosives in the boundaries during the explosive welding process

고 있다. 이종재료의 전체적인 접합변형 패턴은 폭발용접에서 제시되고 있는 통상의 모델과 대단히 유사하다.

폭약이 기폭후 21 μ s 지난 접합과정에서 발생하는 응력 분포도를 Fig. 5에서 보여주고 있다. 이 결과에 의하면 242 Kbar 정도의 최대응력이 진행 중인 충돌접합점에 대단히 가까운 부분에서 나타났고, 충돌점에서 멀어질수록 충격응력의 크기는 감소하고 있음을 알 수 있다. 여기서 폭약이 점화되면서 발생하는 충격파가 부재의 상부로부터 직접 충돌점에 전달된 폭평에너지와 지지대(anvil)로부터 반사되는 에너지가 모재로부터 부재로 전달되면서 부재와 모재사이의 경계면(interlayer)에 집중되기 때문에 특히 충돌점 부근에 큰 에너지가 축적하게 된다.

Fig. 6(a)는 접합할 소재가 서로 같은 구조용 강재에 대하여 Oberg⁽⁷⁾가 SWE2D 유한차분코드를 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과이고,

Fig. 6(b)는 본 연구에서 DYNA2D를 사용하여 얻은 압력분포 결과이다. 본 연구에서 수행한 시뮬레이션 결과에 따르면 충돌점 부근에서의 최고압력은 299 Kbar로 Oberg의 300 Kbar와는 대단히 잘 일치하고 있으며, 이 결과치는 일반적으로 폭발용접에서 사용되고 있는 190~350 Kbar의 범주내에 속하고 있다. 그러나 폭발용접에서 시뮬레이션을 수행하기 위한 폭약의 조건이나 접합조건 등이 다르기 때문에 정량적으로는 약간의 차이를 보여주고는 있으나 정성적인 압력분포 패턴이 충돌점에 크게 집중된다는 사실은 유사하다. Fig. 6의 압력 충격파 분포 형태를 보면 충돌점 중심에서 외곽지역으로 충돌에너지가 급격히 소산되고 있음을 보여주고 있으며, DYNA2D를 사용한 계산결과와 Oberg의 결과 사이에는 충격파가 전파되는 모형에서 차이가 나는데, 이것은 폭약에너지의 크기, 접합소재의 특성, 접합소재의 설계치수에 의존하기 때문인 것으로 사료된다. 여기서 보여준 충돌점의 국부적인 압

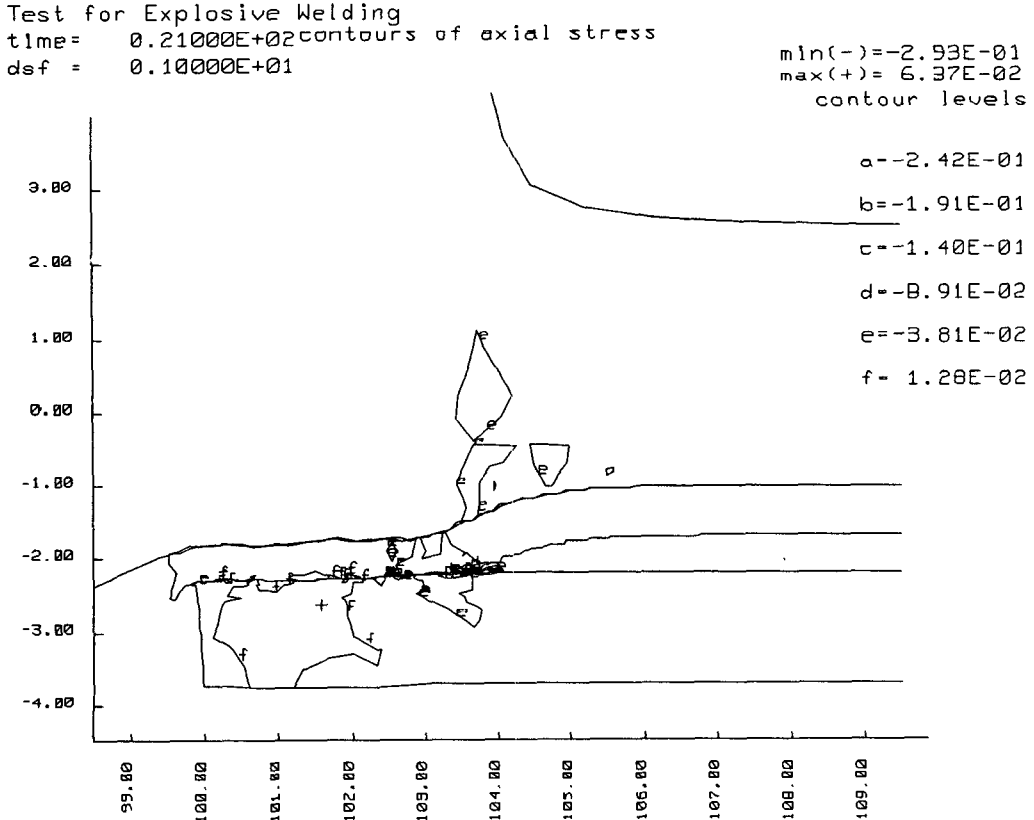
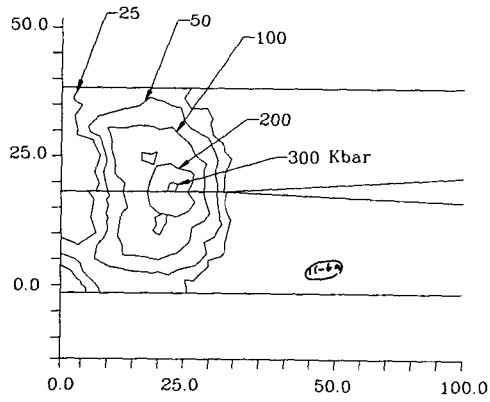


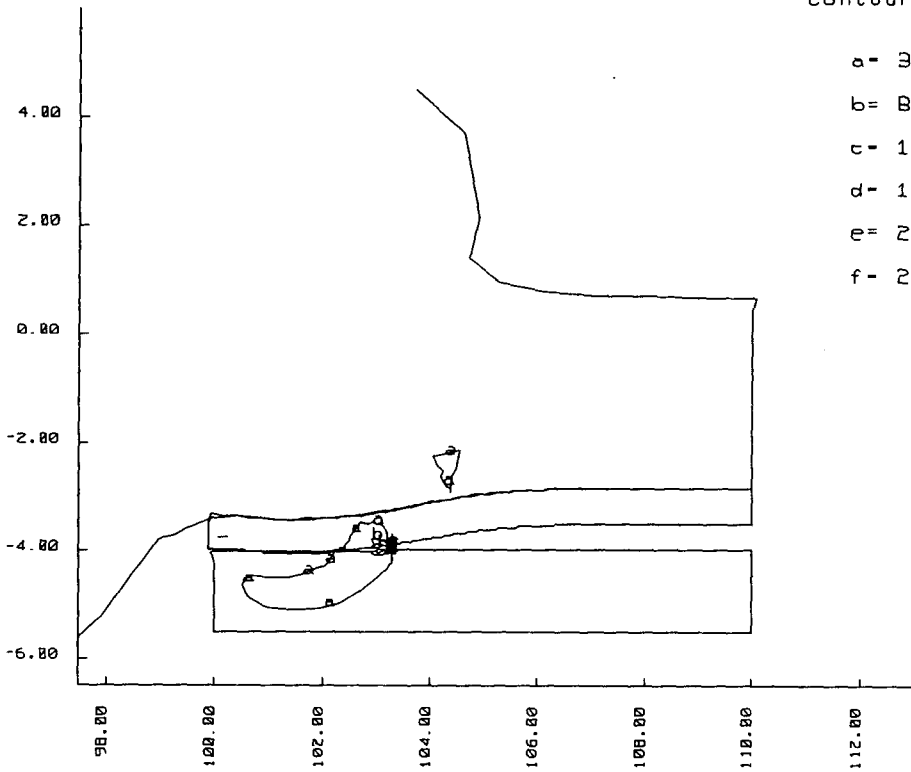
Fig. 5 Axial stress distribution around the collision point during the explosive welding process



(a) Oberg et al.⁽ⁿ⁾

Test for Explosive Welding
 time = 0.22650E+02 contours of pressure
 dsf = 0.10000E+01

min(-) = -1.60E-02
 max(+) = 3.52E-01
 contour levels



- a = 3.65E-02
- b = 8.91E-02
- c = 1.42E-01
- d = 1.94E-01
- e = 2.47E-01
- f = 2.99E-01

(b) DYNA2D

Fig. 6 Comparison between DYNA2D and Oberg's simulated pressure distribution in the impact zone

력 집중현상은 제트와 파형발생의 원인이 되며, 이것이 폭발접합의 원동력이 된다.

Fig. 7은 21 μ s 지난 상태에서 충돌점 부근의 최대 전단응력 분포도를 보여주고 있다. 최대 전단응력 분포를 나타내는 Fig. 7에 의하면 부재가 모재에 충돌하기 전의 전단응력은 비교적 작고, 즉 폭발 에너지에 의한 소재의 유동성은 작으나 충돌점 부근의 계면층에서는 최대 전단응력이 크게 발생하면서 소재의 충돌점 부근에서의 유동현상이 순간적으로 원활하게 진행되어 부재와 모재사이의 계면에서 접합이 연속적으로 진행된다. 이 결과는 Oberg⁽⁷⁾ 등이 제시한 충돌점 부근의 속도장 해석과도 잘 일치하고 있다.

3.2 젯팅해석

폭발에너지를 이용한 이종재료의 접합에서 가장

중요한 역할을 하는 것이 부재가 모재에 충돌할 때 계면에서 발생하는 금속제트(metallic jet)라고 설명하고는 있지만, 이종재료 사이에 순간 초고속 상태에서 접합이 완료됨으로 인하여 실험적으로나 또는 해석적으로 제트현상을 명확하게 증명하기에는 대단히 어렵다. 그러나 제트의 존재는 고속카메라를 이용하여 부분적으로 확인하였으며,⁽¹²⁾ 대체적으로 폭발접합은 제트에 의하여 접합이 이루어진다는 설명이 정설로 받아들여지고 있다.

폭발용접에서 이종재료의 접합강도는 계면에서 발생하는 제트발생에 의하여 결정된다. 폭발접합 소재의 양호한 접합조건은 부재간의 충돌각, 부재의 두께, 충돌점의 이동속도, 부재의 충돌속도, 충돌점 압력, 접합소재의 성질에 의하여 결정되기 때문에 제트를 양호하게 발생시킬 수 있는 최적조건을 안다는 것은 대단히 어렵다. 알루미늄재/강재의

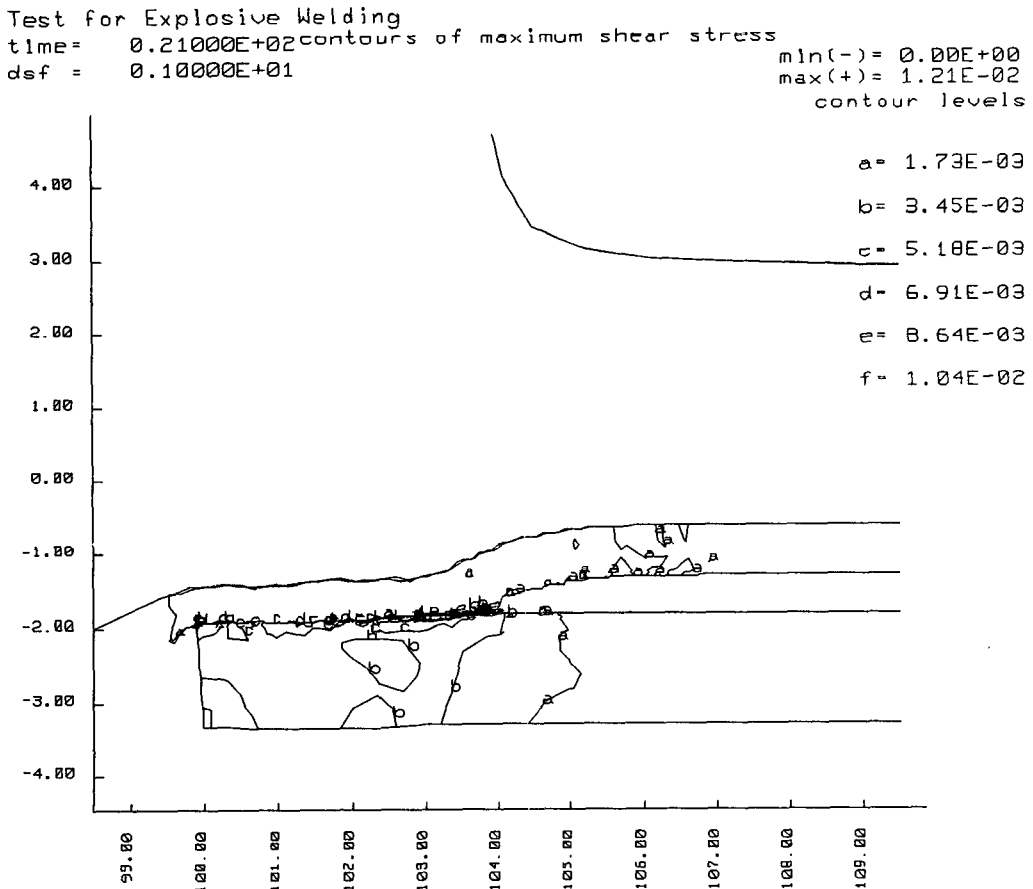


Fig. 7 Maximum shear stress distribution around the collision point during the explosive welding process

이종재질에서 제트의 발생과 성장이 진행되는 시뮬레이션 결과를 Fig. 8에서 보여주고 있다. Fig. 8(a)는 기폭후 $40 \mu\text{s}$ 진행된 폭발접합 상태에 관한 계산 결과이고, 나머지 그림은 연속적으로 시간이 증가함에 따라서 계면에서 제트가 성장하는 과정을 나타내고 있다. 부재가 모재에 충돌할 때 발생하는 계면에서 초창기의 미시적 변형은 Fig. 8(a)에서 보여주고 있는 것처럼 비교적 대칭적으로 일어나지만 시간이 지남에 따라서 비대칭적으로 부재에서 제트가 크게 발달하면서 부재와 모재간의 접합이 진행된다. 또한 제트의 발생 속도는 재질의 항복강도에 의하여 평형을 유지하게 되면서 계면에서는 파형이 형성되고 있음을 Fig. 8(f)에서 보여주고 있다. 여기서 특기할 만한 현상은 Fig. 8(c)에서 제트가 발생되어 파형이 생성하기 시작되는 Fig. 8(f) 까지 걸리는 시간이 $16 \mu\text{s}$ 정도로 대단히 짧은 사실이다. 이것은 접합계면에서의 접합속도가 대단히 빠르게 진행되고 있다는 사실을 계량적으로 제시되었다는 점이 대단히 중요한 결과이다.

미시적 관점에서 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 분석하면 부재가 모재에 초고속으로 충돌하면서 폭평에너지의 진행방향으로 발생하는 충격파(참조 Fig. 6)와 지지대로 부터의 반사파 사이에는 극미한 시간차이로 인하여 두개파 간의 부조화 때문에 발생하는 고주파 진동에 의하여 진폭이 불안정할 정도로 커지는 단계에 도달하게 되면 제트가 발생하는 데 이것을 제트불안정임계점(jet instability criteria; JIC)이라고 할 수 있다. 접합소재의 충돌점 부근에서는 국부적으로 소재의 항복전단강도(yield shear strength)에 비교할 수 없을 정도로 큰 순간극압이 발생하면서 소재는 비압축성 액체처럼 소성적으로 변형 거동하게 된다. 그 결과 접합소재의 계면에서는 일종의 용기현상이 발생하고 동시에 부재의 충돌점 부근에서는 극미한 돌출현상의 시작, 즉 제트가 소재의 전단력 임계상태에 도달할 때까지 계속된다.

3.3 파형해석

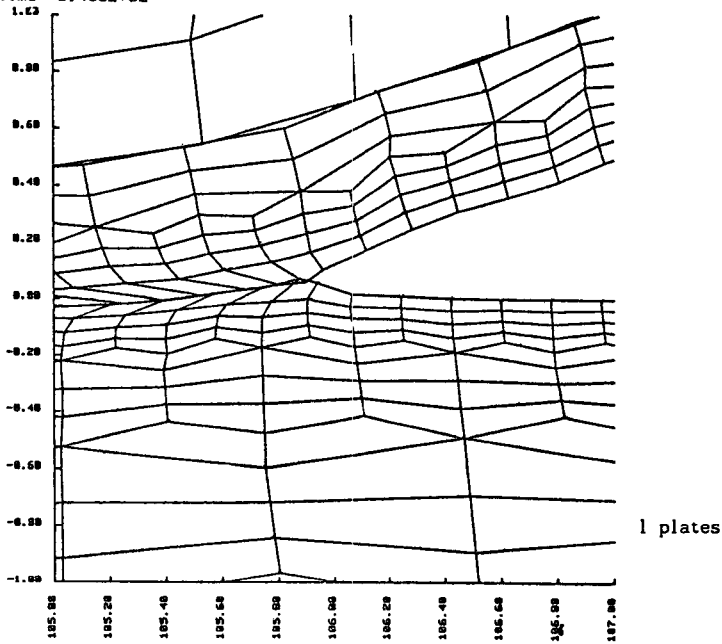
Allen⁽¹³⁾의 실험결과에 의하면 접합계면에서의 파형 생성(wave formation)은 재돌입 제트(reentrant jet)의 발생여부에 의존한다고 보고하였고, 이것은 접합의 이론적 해석시 충돌점 부근에서 고체의 순간 유체유동 개념을 이용할 수 있는 근거를 제공하

고 있다. Abrahamson⁽¹⁴⁾은 제트발생에 따른 계면에서의 파형 생성모형을 Fig. 9와 같이 간략하게 제시하였으며, 실제로 폭발용접은 실험상 대단히 어렵고 비용이 많이 들기 때문에 가능하면 접합계면에서 발생하는 파형의 이론적 모형을 완성하려고 많은 연구를 수행하고 있다.^(15~17)

이종재료의 접합과정중에서 제트를 발생시키고, 궁극적으로 소재간의 접합을 완성시켜 주는 기하학적 변형은 이종재질의 계면에서 형성되는 정현파형(sinusoidal wave or hump formation)이다. 평행한 평판의 접합에서 이상적인 경우 초기 동적충돌각은 시간에 관계없이 일정해야 하나 접합계면에서의 표면용기현상이 발생하기 전의 각도(참조 Fig. 8(a))보다는 충돌하여 순간적으로 표면용기가 형성된 이후의 충돌각도(Fig. 8(f))가 크고, 이러한 현상은 제트가 발생되어 완전히 성장된 정상상태로 도달되어 안정된 파형이 형성될 때 까지 점차로 증가한다. 즉, 부재가 모재에 충돌할 때 발생하는 충돌에너지에 의하여 모재가 순간적으로 고점성 유체처럼 변형되고, 이에 접합하려는 부재도 변형하게 되면서 제트는 발생하게 된다. 접합계면에서 표면의 형상변화는 폭평에너지에 의한 충돌점에서의 충격파 이동속도와 지지대로 부터 계면에 전달되는 반사파의 도달시간 사이에 극미하지만 차이가 존재하기 때문에 충돌점의 전면과 후면을 중심으로 이들 에너지가 재질 자체의 항복강도 보다 크게 되면서 주기적인 표면 용기현상이 나타나게 된다. 이와 같은 결과는 외형적으로는 접합계면에서의 파면(wave surfaces)으로 나타나게 되고, 폭평에너지의 전파에 따른 충돌에너지에 의한 제트 유동에너지와 접합소재의 전단 저항에너지 사이의 균형에 의하여 계면에 연속된 파형이 반복하여 생성하게 된다. 접합계면에 나타난 파도모양은 여러가지의 이종재질 접합방식중 폭발용접에서만 나타나는 독특한 접합모양이다.

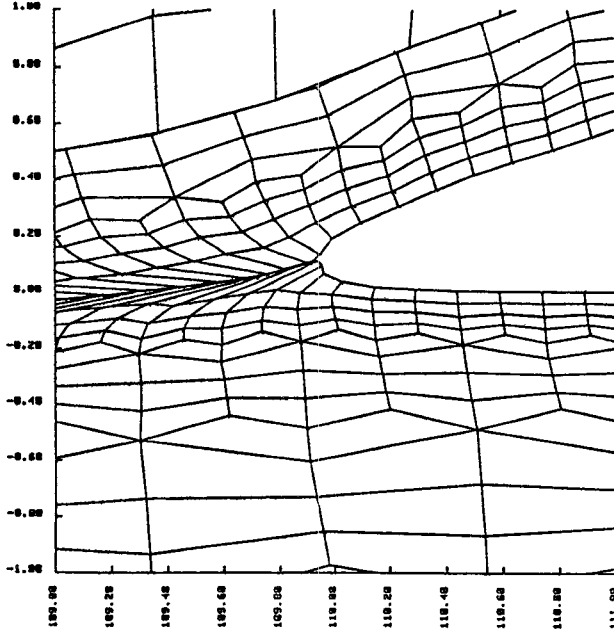
Fig. 5에서 보여주는 것과 같은 충돌점 부근의 응력분포도와 Fig. 8에서 제트형성시에 보여준 형태로 볼 때 계면에서의 파형은 충돌점 직전의 극압에 의하여 소재의 용기현상, 즉 소재의 순간유동에 의한 제트에너지가 충돌점 부근 재질의 전단 저항도와 평형을 유지할 때 까지 소재의 변형이 계속된다. 폭발접합조건이 양호하게 선정되었기 때문에 제트가 잘 발달되었고, 이로 인하여 계면에서의 파형은 Fig. 10의 수치적해석 결과처럼 잘 형성되었다.

Test for Explosive Cladding
def = 0.100E+01
time = 0.400E+02



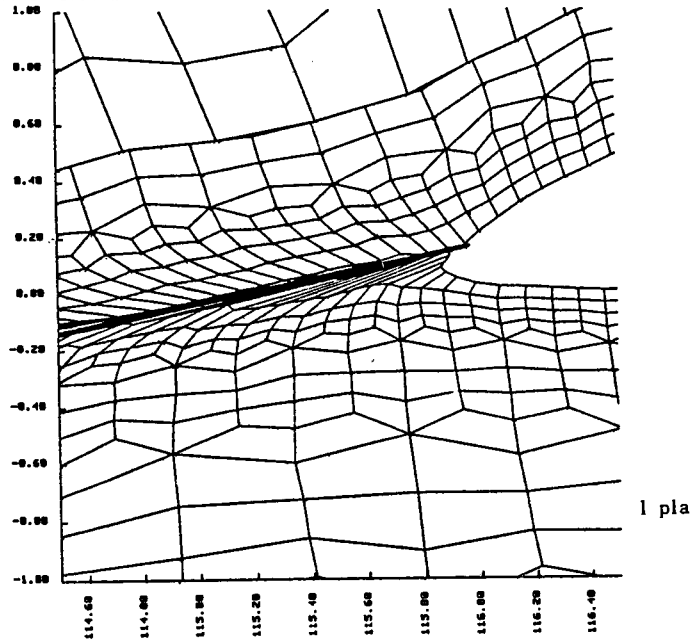
(a) 40 μ s

Test for Explosive Cladding
def = 0.100E+01
time = 0.600E+02



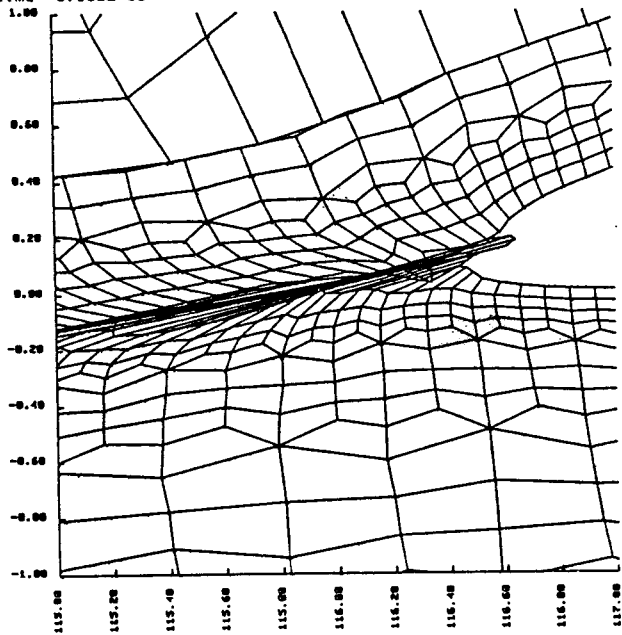
(b) 60 μ s

Test for Explosive Cladding
 def = 0.100E+01
 time = 0.960E+02

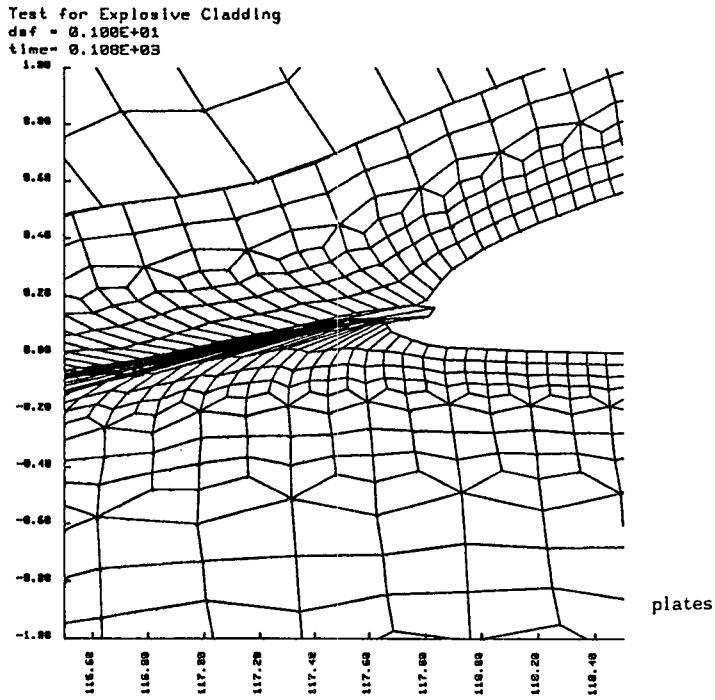


(c) 96 μ s

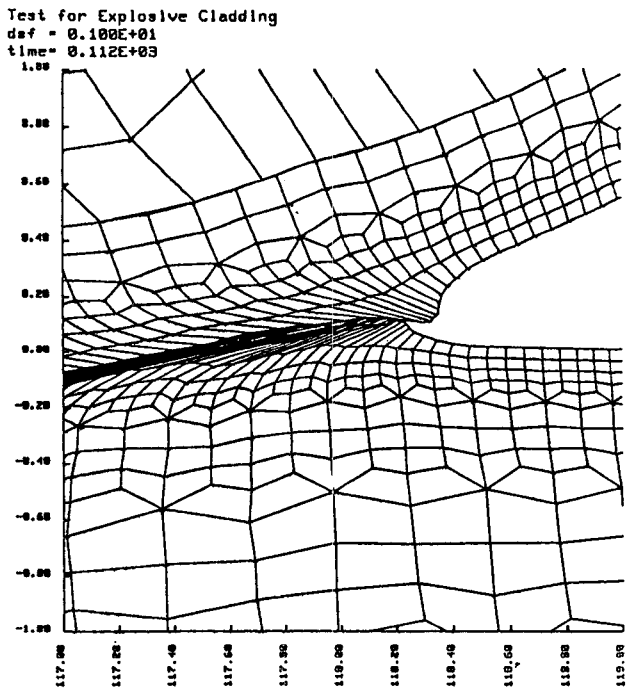
Test for Explosive Cladding
 def = 0.100E+01
 time = 0.100E+03



(d) 100 μ s

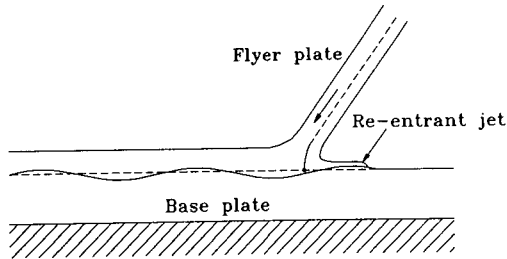


(e) 108 μ s

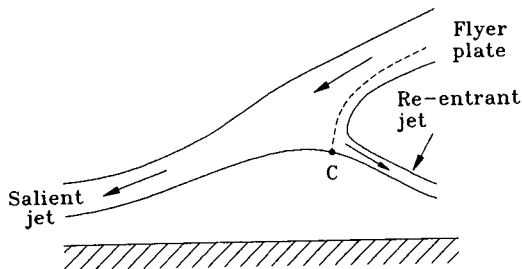


(f) 112 μ s

Fig. 8 Microscopic observation of a jet between aluminium and mild steel plates



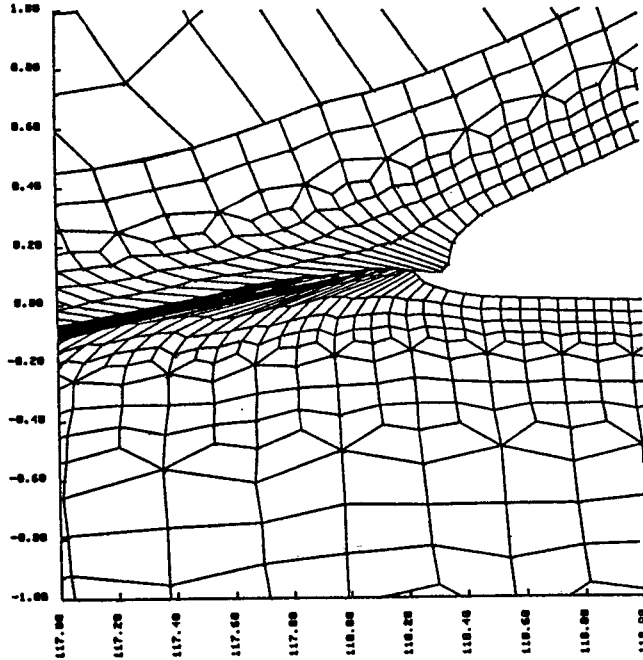
(a) Deformation due to penetration of the metallic jet



(b) Increased hump formation after detonation

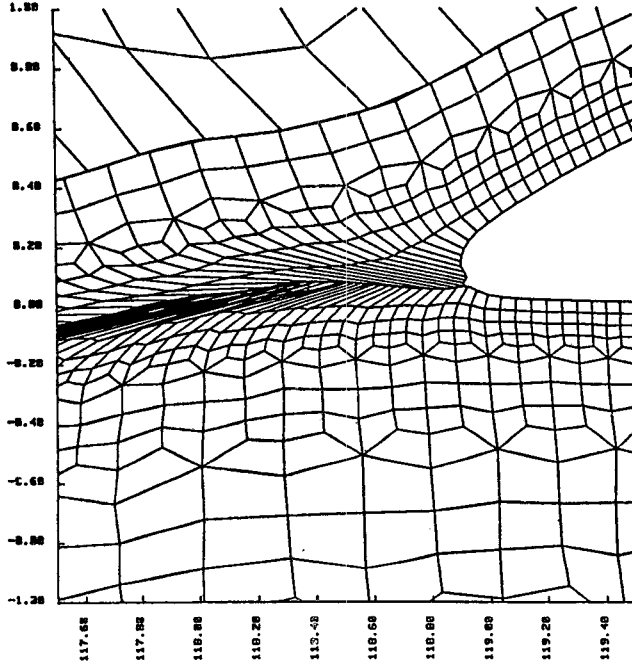
Fig. 9 Mechanism of wave generation

Test for Explosive Cladding
 def = 0.100E+01
 time = 0.112E+03



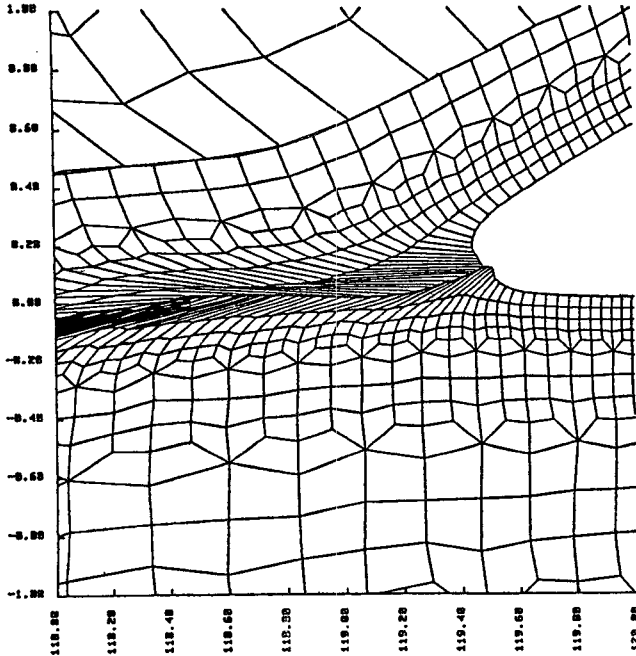
(a) 112 μ s

Test for Explosive Cladding
def = 0.100E+01
time = 0.116E+03



(b) 116 μ s

Test for Explosive Cladding
def = 0.100E+01
time = 0.120E+03



(c) 120 μ s

Fig. 10 Hump formation in the collision zone

폭발 충격에너지는 부재를 통하여 연속적으로 계면에 작용하기 때문에 이에 따른 계면에서 표면 응기현상과 제트가 연속적으로 진행되는 실험적 결과는 Fig. 11에서 보여주는 것과 같이 파형이 잘 형성되어 있다. 여기서 사용된 부재는 Al 5100 알루미늄 합금 계열의 구조용 재료(밀도 : 2.57~2.73 kg/m³)이고, 모재는 Al 1000 계열의 알루미늄 소재(밀도 : 2.41~2.55 kg/m³)이며 완충재료는 고무판(NBR)을 사용하여 부재의 손상을 방지하도록 하였다. 또한 폭발 에너지원으로 사용된 주 폭약 밀도는 0.9~1.1 kg/cm³ 정도의 초안폭약이다. 컴퓨터 시뮬레이션에서 보여준 결과는 일반적인 폭발용접의 실험적 결과와 잘 일치하고 있음에 비추어 볼 때 본 연구에서 사용된 DYNA2D는 폭발용접을 수행하기 전에 폭발용접의 최적조건을 구하는데 대단히 중요한 역할을 할 것으로 사료된다.

3.4 접합기구모델 해석

본 연구에서 얻은 실험 및 해석적 연구결과와 기존에 부분적으로 제시되었던 폭발접합기구에 대한 여러가지의 모델을 정리하면 Fig. 12와 같이 새로운 형태의 접합 메카니즘 모델을 제시할 수 있다. 즉, 두개 이상의 소재를 폭발 충격에너지를 이용하여 접합하려면 Fig. 1과 같이 폭발용접이 준비된 상태에서 Fig. 11과 같이 폭발용접이 완료된 클래드 소재의 중간 접합상태를 모델화시키면 다음과 같다.

- (1) 폭약이 점화되면서 발생하는 순간 극고압 에너지의 부재 전달
- (2) 전달된 부재의 운동에너지에 의한 모재에 연속적인 충격에너지 전달
- (3) 부재와 모재사이의 계면에서 발생된 충격 에너지가 충돌점의 항복 전단강도 보다 커지게 되면

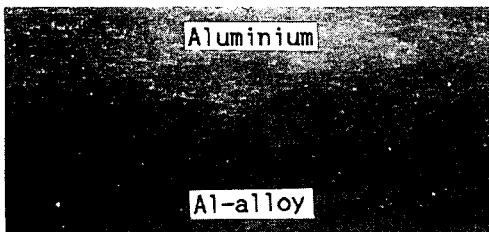
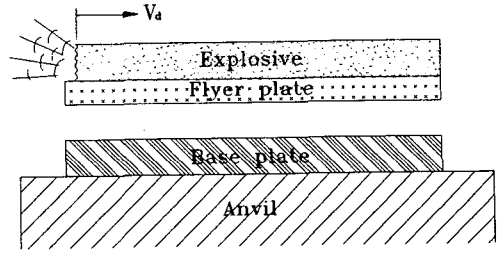
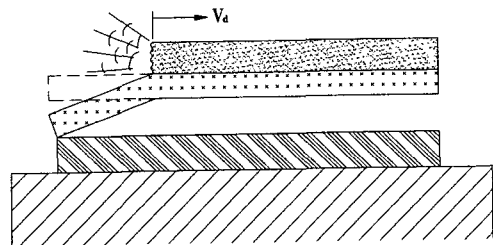


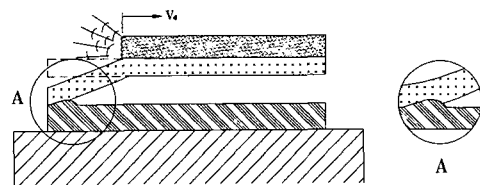
Fig. 11 SEM photograph of the explosive bonded Al-ally/Aluminium interface showing typical wave, X29



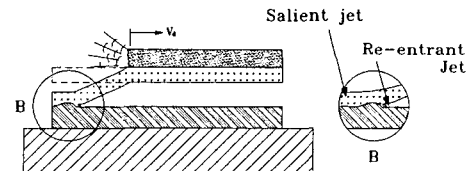
(a) Transfer of energy from the explosive to the flyer plate



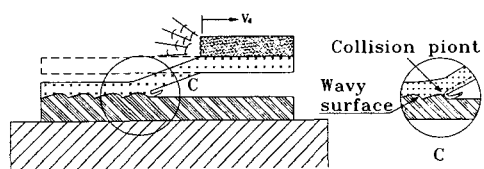
(b) Transformation of flyer plate kinetic energy into deformations at the interface



(c) Hump formation



(d) Jet formation



(e) Periodic wave formation

Fig. 12 Bonding mechanism of explosive welding process

국부적으로 소성유동현상이 발생되면서 충돌점 계면에서는 용기현상(hump generation)의 발생

(4) 접합계면에서 소성유동이 많이 진행된 제트 불안정 입계점 이상에서는 보다 취약한 쪽의 소재 계면에서 압출하는 제트(jet)의 발생

(5) 연속적인 폭발에너지에 의한 접합계면에서 정현파면(sinusoidal wavy surfaces)의 생성

초고압 충격에너지파를 이용한 두가지 이상의 소재에 대한 폭발접합의 특징을 대표한다고 할 수 있는 제트의 발생과 이로 인한 Fig. 11과 같은 정현파면의 발생은 접합소재의 접합강도 측면에서 대단히 중요한 역할을 한다.

6. 결 론

폭약의 폭발시 발생하는 초고압 충격에너지파를 이용한 이종재료의 폭발접합특성을 컴퓨터 시뮬레이션 기법으로 해석하여 실험적인 방법으로는 해결하기 어려운 미시적 관점에서 접합과정을 분석하였다.

부재와 모재의 물리적 성질이 서로 다른 이종재료간의 접합인 경우에 대하여 DYNA2D 유한요소 코드를 이용한 계산결과에 의하면 충돌점 부근에서의 압력크기는 Oberg⁽⁷⁾의 시뮬레이션 결과와 잘 일치하고 있으며, 비대칭적으로 발생하는 제트의 모형은 기존의 Raid⁽¹⁶⁾나 Onzawa⁽¹⁶⁾ 등이 제시했던 모델과 대단히 유사하다. 특히 접합계면에서의 제트가 발생되어 초기의 표면파형이 형성되기까지 걸리는 시간이 16 μ s 정도로 대단히 빠른 속도로 접합이 진행되고 있다. 접합계면에서의 제트발생과 주기적인 파형 형성은 충돌점 부근에서 압력, 온도의 급격한 상승에 따른 계면에서 순간적인 제트불안정임계조건(JIC) 때문이라 사료되고, 이와 같은 접합 메카니즘의 중간과정은 미시적 해석이 가능한 수치적인 해석방법에서만 가능하다.

그 결과 폭발용접의 접합특성 해석과 이에 따른 이종재료의 접합설계 조건을 고가의 실험적인 방법으로 구하지 않고 DYNA2D 코드를 이용한 시행착오방법(trial and error method)을 통하여 접합조건 최적치 설계 가능성을 본 연구를 통하여 확인하였다.

후 기

본 연구는 92년도 교육부 신소재분야 연구지원

(Ministry of Education Research Fund for Advanced Materials in 1992)에 의해 이루어졌음.

참고문헌

- (1) Bahrani, A.S., Black, T.J. and Crossland, B., 1967, "The Mechanics of Wave Formation in Explosive Welding," Proc. Roy. Soc.(A), Vol. 296, pp. 123~136.
- (2) Robinson, R.L., 1975, "The Mechanism of Wave Formation in Impact Welding," Philosophical Magazine, Vol. 131, pp. 587~597.
- (3) Botros, K.K. and Groves, T.K., 1981, "Potential Flow Solution for Two Obliquely Impinging Two-Dimensional Plane Jets of Different Stagnation Pressures," ASME Report 81-FE-18.
- (4) Bahrani, A.S. and Crossland, B., July 1966, "Explosive Cladding," Welding and Metal Fabrication, pp. 252~257.
- (5) Harlow, F.H. and Pract, W.E., 1966, "Formation and Penetration of High Speed Collapse Jets," Phys. Fluids, Vol. 9, pp. 1951~1959.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Hancock, S.L., 1976, "Finite Difference Equations for PISCES 2D ELK," Physics Int. Co., California, TCAM 76~2.
- (10) Cooper, T., 1982, "User's Manual for SWE2D," SweDeFo Report DS 1982 : 14, Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm, Sweden.
- (11) Hallquist, J.O., Jan. 1984, "User's Manual for DYNA2D," Lawrence Livermore National Labo-

- ratories, Report UCID-18756.
- (12) Bergmann, O.R., Cowan, G.R. and Holtzman, A.H., 1966, "Experimental Evidence of Jet Formation During Explosion Cladding," *Trans. Met. Soc. of AIME*, Vol. 236, pp. 646~653.
- (13) Allen, W.A., Mapes, J.M. and Wilson, W.G., 1954, "An Effect Produced by Oblique Impact of a Cylinder on a Target," *J. Appl. Phys.*, Vol. 25, pp. 675~676.
- (14) Abrahamson, G.R., 1961, "Permanent Periodic Surface Deformation Due to a Travelling Jet," *J. Appl. Mech.*, Vol. 28, pp. 519~528.
- (15) Reid, S.R., 1974, "A Discussion of the Mechanism of Interface Wave Generation in Explosive Welding," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 16, pp. 399~413.
- (16) Reid, S.R. and Sherif, N.H.S., 1976, "Prediction of the Wavelength of Interface Waves in Symmetric Explosive Welding," *J. Mech. Eng. Sci.*, Vol. 18, No. 2, pp. 87~94.
- (17) 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.
- (18) Onzawa, T. and Ishii, Y., 1972, "On the Wave Formation in Explosive Bonding," *J. Jap. Weld. Soc.*, Vol. 41, pp. 446.