

研究論文

폭약살포 높이에 따른 Al/steel 폭발 접합계면의 형상 및 조직 변화에 관한 연구

김 희 진* · 강 봉 용*

A Study on the Shape and Microstructural Change of Explosion-Welded Al/Steel Interface with Explosive Thickness

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

Key words : Explosion welding, explosive thickness, Al-clad steel, Ultrasonic test, Intermetallic compound

Abstract

Al or Al-alloy have been known to be able to be clad on various materials by using explosion welding process, however, the intermetallic layer frequently formed along the interface have made this process very complicated. In this study, it was focussed to select the process variables, which can get rid of interfacial layer in the Al-clad steel plate. As a result, it was demonstrated that there was a certain range of explosive thickness which did not form the intermetallic phase as well as the non-bonded area. On the other hand, ultrasonic tests performed for identifying the presence of interfacial layer nondestructively showed that it could be applied for the intended purpose but its result was weakly related with the microstructural quality of interface.

1. 서 론

폭발접합은 공정자체가 매우 간편하다는 장점이 있고, 광폭의 clad 판재를 순간적으로 제조할 수 있다는 특성이 있기 때문에 overlay 용접이 불가능한 이종재료의 clad 판재 제조등에 광범위하게 적용되고 있다. 특히 Al과 steel은 밀도, 강도 및 용

융점의 차이가 극히 크기 때문에 용융접합 방법은 적용 불가능한 것으로 되어 있으며, 현실적으로 마찰접합 또는 폭발접합과 같은 압력용접 방법이 적용가능한 방법중의 하나로 되어 있다. 폭발용접에 의해 제조된 Al/steel의 clad 재료는 기계적 체결 방법인 볼트 이음부보다 전기전도성 및 기계적 성질이 우수하기 때문에 전기천이재 (electrical transition joint) 나 구조용 천이재 (structural

* 정회원, 생산기술연구원

transition joint) 등의 용도로 가장 광범위하게 사용되고 있는 재료중의 하나이다. 이들은 이미 1960년대 부터 Al 제련 공장등에 사용되고 있지만, 최근 까지도 이와 관련된 연구는 계속 진행되고 있다.^{1~3)} 그런데 이들 연구의 주된 관심은 접합부에서 발생하는 금속간 화합물층에 관한 것으로써, 접합부에 금속간 화합물이 생성되면 접합부의 기계적 성질뿐만 아니라 전기적 성질등을 저해하기 때문에 이들을 최소화 또는 생성되지 않도록 하는 것이 연구의 핵심이 되고 있다.

본 연구는 국산 폭약을 사용하여 Al/steel 폭발용접 판재를 제조함에 있어서 폭약살포 높이가 상기한 금속간 화합물의 생성에 미치는 영향을 검토하고, 이를 토대로 최적공정 변수를 설정하고자 하는 목적으로 수행되었다. 이와함께 금속간 화합물층의 생성여부를 비파괴적인 방법으로 확인하기 위해 초음파(UT) 시험을 병행하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

Clad 판재 제조에 사용된 모재는 90(W) × 160(L) × 9mmt 크기의 연강(mild steel, SS41)으로 하였으며, flyer plate는 모재보다 다소 넓은 100 × 180 × 2.5mmt 크기의 Al 판재(Al100)를 사용하였다. 준비된 판재는 판재 사이의 간격을 flyer plate의 두께와 같은 2.5mm가 되도록하여, 모래위에 Fig. 1과 같이 설치한 다음, flyer plate 위에는 스티로폼로 dam을 만들어 폭약을 살포하였으며, 뇌관은 길이 방향(L-방향)으로 폭발이 진행 되도록 설치하였다. 폭약은 국내 H사에서 생산하여 시판되

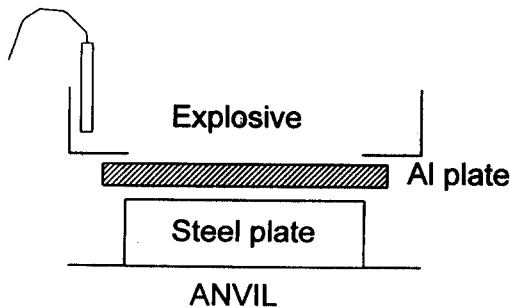


Fig. 1 Experimental set-up for explosion welding

고 있는 초안(Ammonium Nitrate, AN) 폭약을 사용하였다.

본 연구에서 실험변수는 폭약 살포 높이로 한정하였는데, 이는 폭발용접 변수 중에서 가장 중요한 변수인 폭발속도가 폭약 높이에 의해 결정되기 때문이다.⁴⁾ 본 실험에서 선택한 폭약살포 높이는 10, 15, 20 및 30mm 이었다. Table 1 은 각각의 폭약높이에서 얻어지는 폭발속도(detonation velocity)를 참고문헌(4)에서 발췌하여 보여주고 있다. 시편은 각 조건에서 1매씩의 제조하였으며, 제조된 시편은 폭약 살포 높이(H)에 따라 AN10, AN15, AN20, AN30 이라고 명명하였다.

Fig. 2는 폭발용접된 시편중 Al10과 AN20 시편을 보여주고 있는데, AN10의 경우는 폭발력이 부족하여 Al 판재의 여유분이 완전히 절단되지 않은 상태로 clad 판에 붙어 있었으며, AN15시편 부터는 완전히 절단된 상태로 나타났다. 접합된 시편은 사진에서 보는바와 같이 표면에 20×20mm의 grid를 만들어 각각의 위치에서 초음파 검사를 실

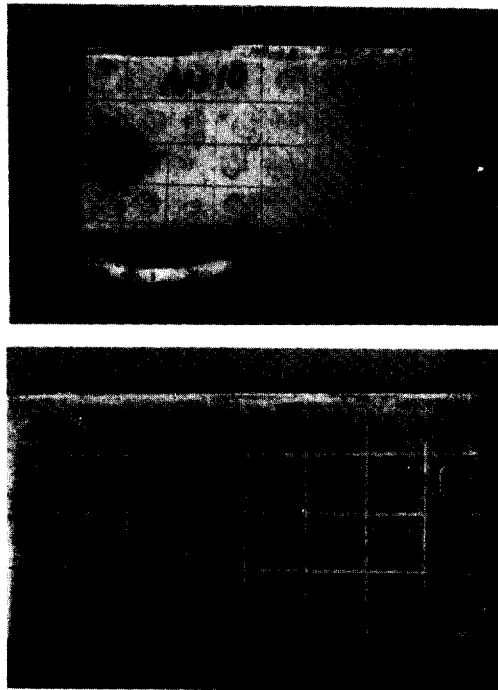


Fig. 2 As-welded plate condition of AN10 and AN20

Table 1. Detonation velocity measured by Dautriche method¹

Explosive height	Detonation velocity
10mm	-
15mm	1,419 m/sec
20mm	1,550 m/sec
30mm	1,974 m/sec

Table 2. Experimental conditions of ultrasonic test

장치명(S/N)	Epocho II (2002/1503)	시험방법	수직탐상 (펄스반사법)
접촉매질	글리세린	기준감도	33.8dB
사용탐촉자	5Mhz, 0.25inch	탐촉자번호	NORTEC15691
사용표준 시험편	II W A01177	스크린 Range	2mm/div
대비시험편	시험품 사용	기타조건	KS B 0817에 따름

시하였다. 초음파 신호진폭은 시험 표면의 조건, 접촉압력 및 접촉매질 등에 의해 영향을 받으므로, 그러한 영향을 최소화하기 위하여 Fig. 3과 같이 모재의 밀면에서 반사되는 신호(화살표 2개로 표시된 신호)의 진폭을 100%로 하고, 이때 계면에

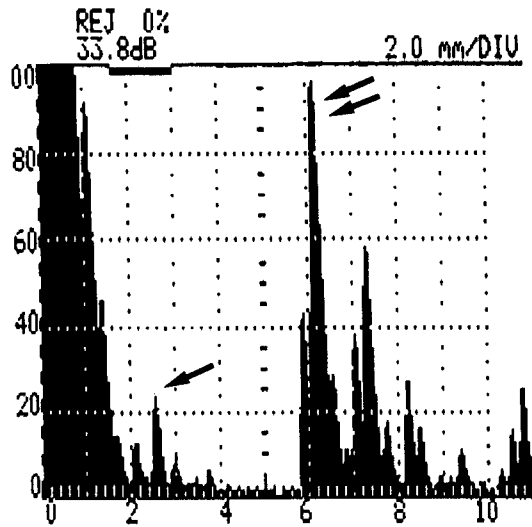


Fig. 3 Typical pattern of ultrasonic test signals

서 반사되는 신호(화살표 1개로 표시된 신호)의 진폭을 시험결과로 사용하였다. 그 밖에 자세한 시험장치 및 시험조건은 Table 2와 같다.

3. 실험결과

3.1 용접시험 형상

폭발용접된 시험편은 먼저 육안관찰을 통하여 판재간 접합여부, Al 판의 상부 표면상태 그리고 시험편의 변형정도등을 상대 평가하였는데, 그 결과를 Table 3에 정리하였다. AN10 시험편을 제외한 모든 시험편은 온전히 용접된 상태로 보였지만, Al의 표면상태(폭약 접촉부위)는 폭약살포 높이가 증가함에 따라 거칠게 될 뿐만 아니라, 판재의 변형량도 커지게 됨을 알 수 있었다. 특히 AN30의 경우는 시험편의 변형 정도가 육안으로 확인할 수 있을 정도로 다소 심하게 나타났는데, Fig. 4는 변형정도의 차이를 용접된 시험편의 단면 형상으로 보여주고 있다.

Table 3 Apparent condition of explosion-welded Al clad plate

Specimen	Surface condition of Al	Plate condition
AN 10	as-initial condition	flat but not welded
AN 15	nearly initial condition	flat and fully welded
AN 20	slightly damaged	flat and fully welded
AN 30	severely damaged	slightly deformed and fully welded

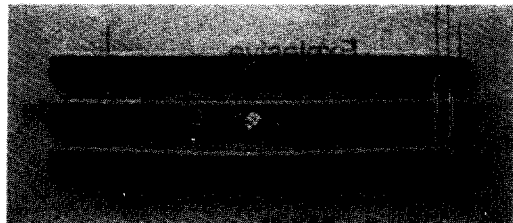


Fig. 4 Flatness of explosion welded plates of AN 15(top), AN20(middle) and AN30(bottom)

3.2 초음파 시험결과

앞절에서 설명하였듯이 Fig. 3은 UT시험에서 나타난 결과의 한 예를 보여 주는것인데, 모재의 밑면에서 반사되는 신호를 100%로 하였을때 계면에서 반사되는 신호를 찾아 그 신호의 높이를 데이터(data)로 기록하였다. 이렇게 시험된 결과를 Fig. 5에 종합하였는데, 육안으로 관찰한 결과와 동일하게 AN10 시편은 거의 전 면적에 걸쳐 접합이 이

◎ : Location of Detonator, ** not bonded

AN10	25	**	**	**	**	**	**	**
	30	**	**	**	**	**	**	**
	◎	**	**	**	**	**	**	**
	25	**	**	**	**	**	**	**

AN15	25	20	34	20	30	20	20	24
	34	35	30	27	30	30	30	23
	◎	35	24	24	30	30	30	20
	20	30	22	24	30	20	20	22

AN20	40	20	20	30	30	30	20	30
	30	30	30	20	38	30	40	20
	◎	40	30	24	30	34	35	22
	20	30	20	30	35	35	20	35

AN30	20	25	25	20	30	20	10	35
	25	20	30	35	40	40	30	35
	◎	25	30	35	45	40	30	40
	30	30	33	35	40	40	40	40

Fig. 5 Results of ultrasonic test

루어지지 않은 상태였으며, 그 밖의 시편은 모두 접합이 이루어져 있었다. 그러나 접합된 시편의 결과치를 자세히 살펴보면, 위치에 따라 동일 시편내에서 다소 차이를 보여 주지만, 대체적으로 폭약 살포 높이가 높아짐에 따라 계면에서 반사되는 신호 높이가 높아지고 있음을 알 수 있다. 이를 보다 정량화 하기 위하여 시편 중앙부의 사각형으로 표시된 부위에서 나타난 결과를 평균하여 Table 4에 정리하였다. 이 Table에 나타난 수치를 보면, AN20과 AN30 시편간의 차이가 다소 크게 나타나고 있음을 알수 있는데, 이는 이들 두시편의 접합계면에 어떤 차이가 있을 수 있음을 의심케 하는 결과이다. 따라서 다음절부터 설명되는 계면 형상 및 계면조직과 관련된 보고는 모두 이들부위(사각형으로 표시된 부위)에서 얻어진 결과들이다.

Table 4 Average height of ultrasonic signal varied with explosive height (H)

Specimen(Explosive height)	Average of peak height(%)
AN 15(H = 15mm)	30
AN 20(H = 20mm)	33
AN 30(H = 30mm)	41

3.3 접합계면의 미세조직

3.3.1 AN30 시편의 접합계면

광학 현미경상에서 확인된 AN30 시편의 접합 계면은, Fig. 6에서 보여주는 바와 같이(접합계면의 상측이 Al이며 하측이 steel임, 이후 모든 사진에서도 상측은 Al이며 하측은 steel임) 파도와 같은 파형(wave)을 보여주고 있었다. 이러한 파형은 폭발접합 계면의 전형적인 양상이기는 하지만, 본 시편에서 보여주고 있는 파형은 전형적인 폭발접합 파형과는 차이가 있음을 발견할 수 있었는데, 본 파형의 주기는 평균 6mm로 매우 넓었을 뿐만 아니라 높이는 평균 0.1mm 정도로 매우 낮게 형성되어 있었다.

본 계면에서 보다 특이하게 관찰된 사실은 steel

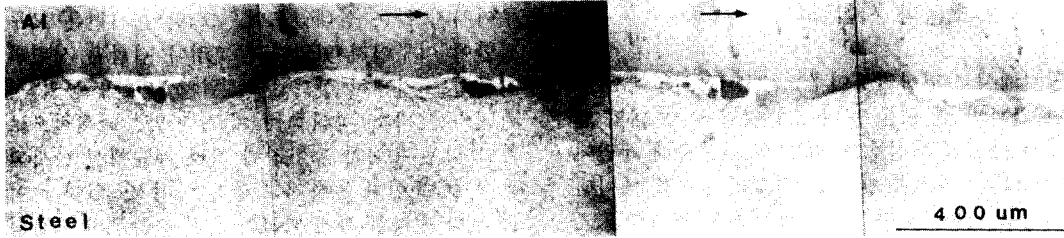


Fig. 6 Optical micrograph taken along the Al/steel interface of AN30 specimen (arrows indicate the detonation direction)

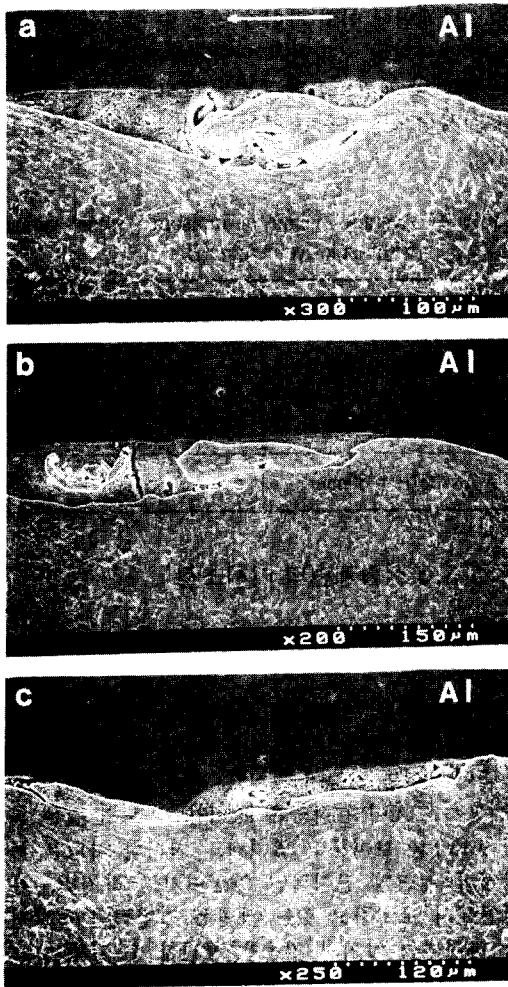


Fig. 7 Various shapes of steel drops formed with wave formation

표면이 파도처럼 밀려 나가면서 방울 모양으로 떨어져 나간 형상을 하고 있다는 것인데, 이와 같이 떨어져 나간 steel 입자 주위에는 2차상이 존재하고 있고, 2차상 내부에는 steel 방울 외에도 porosity와 균열이 다수 생성되어 있다. Fig. 7은 계면부근에서 관찰될 steel 입자의 여러가지 형상들을 보여주고 있는데 (a)는 입자가 떨어져 나가기 직전의 상태에서 접합이 이루어진 형상을 보여주고 있으며, (b)는 떨어진 직후에 접합이 이루어진 형상이며 (c)는 steel 입자가 멀리 밀려나가 계면에 압착된 상태로 접합이 이루어진 형상을 하고 있다. 그러한 steel 입자들은 (c)의 경우를 제외하고는 모두 계면에 생성되어 있는 2차상내에 존재하고 있었다. 특히 Fig. 7(b)에서는 2차상 내부에 생성된 균열을 함께 보여주고 있는데, 이와 같은 균열은 계면에 수직된 방향으로 2차상을 관통하고 있었다.

한편 접합계면의 Al 측에 생성되어 있는 2차상은 모두가 파형의 골쪽에 존재하였으며, 거의 모든 골 부위에서 발견되었다. Fig. 8은 그러한 2차상의 성분을 x-ray mapping 한 결과로써, Fe와 Al 이외의 성분은 나타나지 않았다. 이를 WDX를 사용하여 정량 분석하여 본 결과 Al을 82%, Fe를 18% 함유하고 있음을 확인할 수 있었다. 본 결과는 Hokamoto²⁾의 분석결과와 완전히 일치하고 있다.

Al-Fe 상태도에 의하면, Al과 Fe 사이에서 생성 가능한 금속간 화합물은 Fe_2Al , $FeAl$, Fe_2Al_5 , Fe_4Al_{13} 의 5가지 종류가 있는데, Al 함량이 가장 높은 Fe_4Al_{13} 의 Al 함량이 약 60% 정도밖에 되지 않기 때문에, 2차상 전체가 금속간 화합물이라고 할 수는 없다. 이에 대해서 Izuma 등¹⁾은 A5083/SUS 304의 폭발접합 계면에 생성된 계면층을 X-ray 회

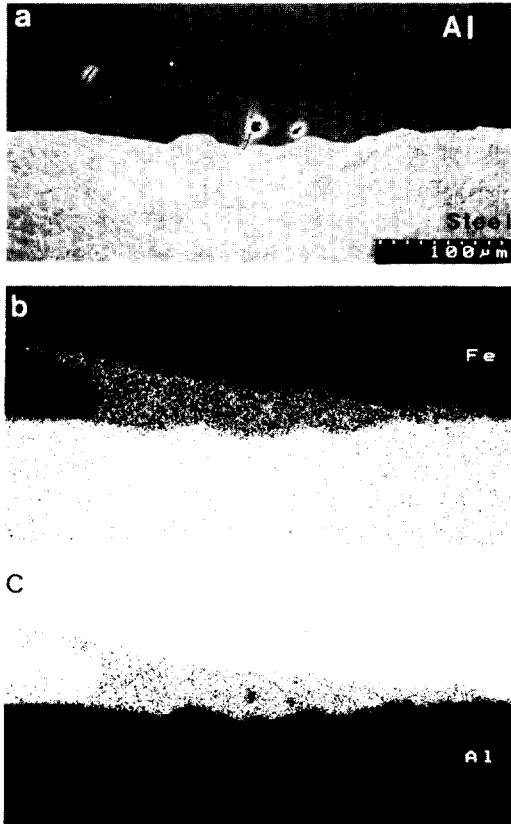


Fig. 8 X-ray analysis of second phase shown in (a) SEM micrograph, (b) Fe-mapping and (c) Al-mapping

절분석을 이용하여 Al과 Fe_4Al_{13} 의 혼합조직이라고 보고한 바 있다. 그러나 같은 방법으로 Al합금/Al/steel 계면을 분석한 국내보고⁹⁾에 의하면 Al과 steel 계면에서 생성된 중간층이 Al과 Fe_2Al 의 혼합물이라고 하고 있다. 이상과 같이, 연구자에 따라 계면층에 존재하는 금속간 화합물이 어떤 것인가에 대해서는 차이가 있지만, 한가지 확실한 것은 이러한 중간층이 Al과 Fe-Al 금속간 화합물의 혼합물로 구성되어 있다는 것이다. 그리고 본 2차상의 미세경도(Hv, 0.1kg)는 330~340로써 Al(35~40) 및 steel(180~200)보다 훨씬 높은 수치를 보여 주었는데, 이 또한 금속간 화합물의 존재를 간접적으로 보여주고 있다.

Fig. 9는 AN30 시편의 계면에서 나타난 2차상을

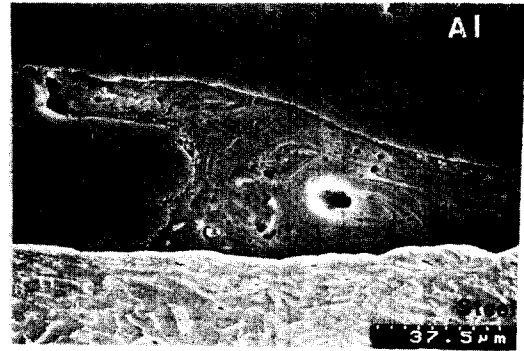


Fig. 9 SEM micrograph showing the details of secondary phase

보다 고배율로 관찰한 결과이다. 이 사진은 2차상이 용융된 상태에서 심하게 소용돌이 치면서 생성되었음을 보여주고 있는데, 최종적으로 응고되는 중심부에는 응고수축에 의해 기공(porosity)이 생성되어 있음도 보여주고 있다. 이와같이 2차상 내부의 응고형상(pattern)이 전혀 손상되지 않은 상태로 나타나고 있는것은 2차상의 응고가 계면접합이 이루어진 다음에 진행되었음을 의미하는 것이다. 그리고 2차상에 발생한 균열은 응고·냉각 과정에서 발생한 내부응력에 의해 발생한 것이라고 할 수 있다. 또한 Fig. 9에서 2차상의 상하 계면을 보다 자세히 살펴보면 Al-Fe 상과 Al 간의 접합은 완전한 반면 Al-Fe 상과 steel 계면은 접합이 온전치 않아 보이는데, 이 또한 용접이 진행된 후에 2차상이 응고되었음을 확인시켜 주고 있다.

3.3.2 AN15 및 AN20의 접합계면

AN15 및 AN20 시편의 계면은 직선형상을 하고 있었는데, Fig. 10은 광학 현미경상에서 관찰된 접합계면의 전형적인 형상을 보여주고 있는데, 본 사진은 AN20 시편에서 찍은 것이다. 한편, Fig. 11(a)과 (b)는 SEM 상에서 보다 고배율로 관찰된 계면형상을 보여주고 있는데, 파형 형상은 어디에서도 찾아볼 수 없었다. 그러나 AN15 시편의 접합계면을 보다 자세히 관찰하여 본 결과, 미세하나마 접착되지 않는 부위가 존재하고 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 11(c)는 그와 같은 미용작부를 보여 주고 있는데, 이들의 크기는 대부분 $10\mu m$ 이하

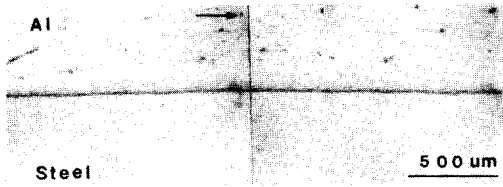


Fig. 10 Optical micrograph of Al/steel interface typically shown in AN15 and AN20 specimens. (this photo is taken from AN20 Specimen)

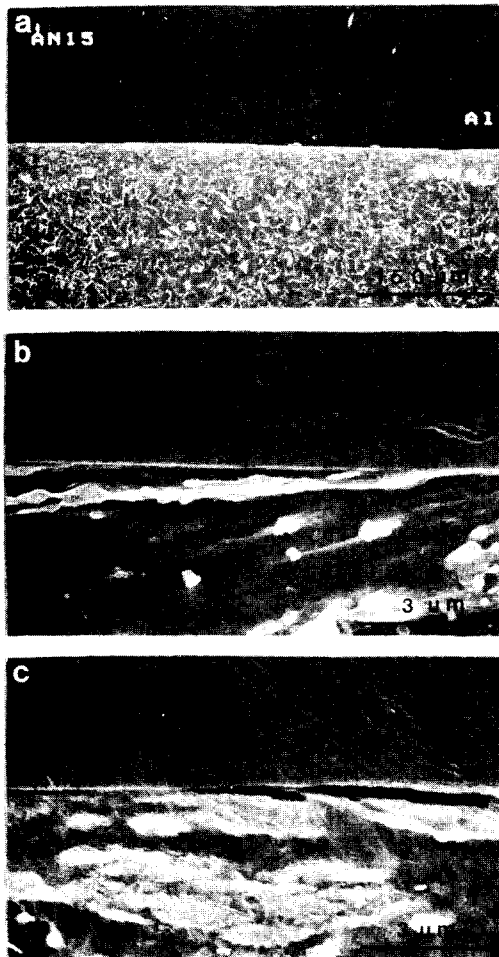


Fig. 11 SEM micrographs showing the details of Al/steel interface of AN15

였으며 20mm의 접합부에서 약 80여개 정도가 발견 되었다. 이들은 매우 미세할 뿐만아니라 그 형상 자체가 균열의 형상을 가지고 있어, 접합이 되지 않았다기보다는 접합된 후에 연이어 발생하는 반사파 때문에 접합력이 약한 부분이 국부적으로 debonding 된 것으로 생각된다.

한편 AN20 시편에서는 이와 같은 균열성 미용착부는 전혀 발견되지 않았는데, 이는 화약높이가 증가하여 계면의 접착력이 충분히 확보 되었기 때문이라고 생각된다. 계면은 Fig. 10에서 보여 주듯이 전체적으로 직선형상을 가지고 있었지만, 극히 일부분에서 파형이 생성되려고 하는 초기현상을 보여주고 있었다. Fig. 12는 그와 같은 부위를 보여주고 있는데, 이와 같이 파형이 나타나고 있는 부위에서는 항상 2차상이, 화살표로 표시된 바와 같이, 골 부위에 생성되어 있었다. 이와같은 사실은 2차상의 생성여부가 파형형성과 매우 밀접한 관계를 가지고 있음을 입증하여 주고 있다.

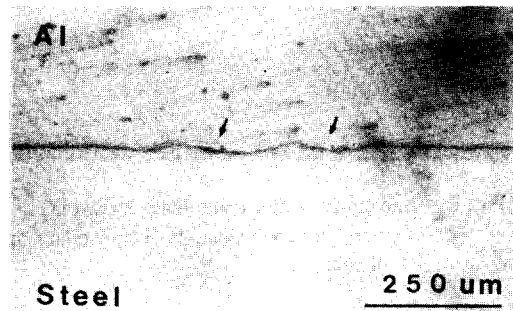


Fig. 12 Optical micrograph showing the localized waves formed in AN20 specimen. Note the secondary phase formed in the valley side of the waves.

4. 검 토

4.1 폭약의 적정 살포 높이

폭발 접합 계면의 가장 큰 특징은 접합 계면이 파도와 같은 형상을 하고 있다는 것인데, 경험적으로 이와같은 형상이 나타나게 되면 계면의 접합강도가 충분하다고 하는 공통된 인식이 있기 때문

에, 폭발접합 관재의 품질을 평가하는데 있어서 계면의 형상은 매우 중요한 품질관리 항목으로 사용되고 있다. 그러나 본연구 결과에서 보여주는 사실은 Al/steel 계면에 파형이 형성되면 항상 Al-Fe 금속간 화합물의 2차상이 생성 되고, 이러한 2차상은 용융 및 응고 되는 과정을 거치면서 내부 결함을 초래할 뿐만아니라 steel 관재와의 접합을 불량하게 만드는 것으로 나타나고 있다. 반면 접합계면이 직선형상을 하게 되면 2차상은 전혀 생성되지 않고 있는 것 또한 사실이다. 따라서 Al과 steel을 직접 접합하고자 하는 경우에는 접합계면이 직선상으로 나타나는 조건이 보다 바람직한 조건이라고 하겠다. 그러나 Al/steel 계면이 직선 모양을 취하고 있다고 하더라도, 폭약량이 너무 적을 경우에는 균열성 미용착부가 생성되기 때문에 어느정도 이상의 폭약량이 필요하다고 하겠다. 본연구의 결과로부터 그러한 적정높이를 예측해 보면, 본 연구에 적용된 폭약 및 소재 조건에서, 15~20mm의 범위에 있다고 할 수 있다.

4.2 초음파 검사 결과의 유효

Clad 재료에 있어서 초음파 검사는 매우 광범위하게 사용되고 있는 비파괴시험 방법인데, 이는 주로 접합 여부 판정에 적용되어 왔다⁶⁾. 본연구 결과 (Fig. 5)에서도 초음파 검사는 접합 여부에 대해서 매우 확실하게 구분하여 주고 있기 때문에 이의 활용가치가 충분히 있다고 하겠다. 그러나 본 연구에서는 계면에서의 금속간 화합물 생성 여부까지도 확인 가능할 것으로 생각하고 본 시험을 실시하였던 것이다. 다행히 금속간 화합물이 많이 생성되어 있는 AN30 시편의 반사파 신호가 경계층이 거의 없는 AN20 시편보다 상당히 높게 나타나는 바람직한 결과를 보여주었다. 그러나 한편으로는 미세한 미접합부가 다수 존재하는 AN10 시편이 가장 양호한 결과를 보여 주고 있어 그 신뢰성을 다소 떨어뜨리고 있다.

결국 계면층 존재여부를 초음파 검사만으로 확실하게 판단할 수 있다고 주장하기는 다소 어렵겠지만, 검사결과 UT 신호가 어느정도 이상으로 높게 나타나는 경우에는 그 존재 가능성이 높다고 의심해 보는 것은 가능할 것이다. 앞으로 이들의 상관관계를 보다 확실하게 하기 위해서는 보다 많은

data의 축적이 필요하며, 이를 토대로 적절한 기준이 설정되어 진다면, 초음파 검사는 매우 유용한 품질관리 도구가 될 수 있을 것이다.

5. 결 론

국내에서 생산되는 초안 폭약을 사용하여 Al(A1100)/steel 간의 폭발접합 공정을 정립하고자 폭약 살포 높이를 변수로 하여 수행한 본 연구로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) Al/steel 계면 형상은 폭약 살포 높이가 증가함에 따라 직선형에서 과도형으로 바뀌게 되는데, 과도형이 나타나게 되면 계면에는 항상 금속간 화합물을 함유한 2차상이 생성된다.
- (2) 한편 폭약살포 높이가 적정수준 이하일 경우에는 접합이 되지 않거나, 접합이 이루어지더라도 계면에 균열성 미접합부가 존재하게 된다.
- (3) 따라서 최적의 폭약살포 높이는 접합면이 직선형으로 나타나는 조건이면서 상기한 균열성 결함이 나타나지 않는 조건이 되어야 하는데, 본 시험의 경우를 예로 들면 최적높이는 15~20mm의 범위에 있다.

Referrence

1. T. Izuma, K. Hokamoto, M. Fujita and M. Aoyagi : Single-shot Explosive Welding of Hard-to-Weld A5083/SUS304 clad Using SUS 304 Intermediate Plate, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol. 10, No. 1, (1992), pp. 101-106
2. K. Hokamoto, I. Izuma and M. Fujita : New Explosive Welding Technique to weld Aluminum Alloy and Stainless steel plates Using a stainless steel Intermediate plate, Met. Trans. A, Vol. 244, No. 10, (1993), pp. 2289-2297
3. A. Y. Trykov and W. Scholz : Explosive Welding of Steel to Alumium, Proc. of IIW

- Asian Pacific Welding Congress, Auckland, New Zealand, (1996), pp. 827-834
4. 김희진, 강봉용 : 폭약변수에 따른 폭발속도 변화에 관한 실험적 연구, 대한용접 학회지, Vol. 14, No. 2, (1996) pp.
 5. 문정기 : 이종재료의 폭발접합에 관한 연구, 박사학위 논문, 홍익대학교 (1992)
 6. N. Shinohara : Relation between the Results of Nondestructive Testing and the Strength of Explosively Bonded clad steel, J. of JWS, Vol. 50, No. 4, (1981), pp. 71-76