

# 모넬(Monel)-Clad 파이프의 오버레이 용접 적층수가 용접성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

최혁<sup>1</sup>, 박준홍<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>동아대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup>동아대학교 기계공학과

## Experimental Research on the Effect of the Number of Layers by Overlay Welding of Monel-Clad Pipe on Weldability

Hyeok Choi<sup>1</sup>, Joon-Hong Park<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Mechanical Engineering in the Graduate School of Dong-A University

<sup>2</sup>Dept. of Mechanical Engineering of Dong-A University

**요약** 오버레이 용접은 희석율에 의해 적층 두께에 따라 화학성분 함량과 용접부의 경도에 영향을 미치며 이는 파이프 제품의 표면성질을 결정한다. 이로 인해 오버레이 용접은 적층의 수를 고려하여야 한다. 본 연구에서는 탄소강 모재에 내부식성 소재인 모넬 소재를 오버레이 용접하여 적층수에 따른 Fe함량, 모재와 모넬 소재와의 용접성, 부위별 경도와 표면 평탄도를 실험적으로 연구하였다. 각각의 평가는 평판의 모재와 파이프 모재에 3개의 층으로 오버레이 용접 후 실시하였다. Fe함량은 각 층별 시료를 채취하여 성분 분석을 통해 평가하였으며, 3Layer에서 만족하는 함량을 나타내었다. 또한 적층별 시편을 벤딩 시험하여 용접성을 평가하였다. 적층별 경도와 비드 평탄도는 Micro Vickers와 3차원 측정을 통해 평가하였다. 경도는 1Layer에서 발생하는 HAZ부에 의해 가장 높은 경도 값을 보였으며, 적층이 증가할수록 경도가 감소하였다. 비드 평탄도의 경우 적층수 증가에 따라 편차가 급격한 차이가 발생하였으며, 이는 경도와 함께 사용 목적의 측면에서 주의 깊게 고려해야 한다. 이러한 실험적 결과는 목적에 따른 용접 파이프 적층수의 결정 방법을 나타내었다.

**Abstract** Overlay welding affects the chemical components and weld hardness by dilution of the lamination layer thickness, which determines the surface properties. This study experimentally investigates different numbers of layers for overlay welding monel materials, which are anti-corrosion materials. The Fe content, weldability of the base metal and monel materials, hardness, and surface flatness were examined. Each evaluation was carried out after overlay welding with three layers on the base material and pipe base material of the plate. The Fe content was evaluated by analyzing the constituents of each layer. The Fe content was satisfactory in the three layers. The weldability of the laminate specimens was evaluated by a bending test. The hardness and bead flatness of the laminate specimens were evaluated by micro Vickers and 3D measurements. The hardness was highest in the heat-affected zone with one layer, and it decreased with increasing lamination. In the case of bead flatness, there is a sharp difference in the deviation with increasing numbers of laminations, which should be considered carefully.

**Keywords** : Clad pipe, The number of the layers, Monel, Overlay welding

### 1. 서론

여러 산업에서 내부식을 위한 표면성질 향상은 중요

한 연구 분야다.[1]이를 개선하기 위한 오버레이 용접(Overlay welding)은 내식성, 내열성을 가지는 합금 용접재료를 모재 표면에 균일하게 용착시켜 재료의 표면

본 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

\*Corresponding Author : Joon-Hong Park(Dong-A Univ.)

Tel: +82-51-200-7645 email: acttom@dau.ac.kr

Received July 5, 2016

Revised November 9, 2016

Accepted November 10, 2016

Published November 30, 2016

성질을 향상시키는 표면처리의 한 방법이다.[2] 또한 공정 준비와 과정이 간단하여 내부식성 향상을 위해 여러 산업에서 널리 사용되고 있으며[3], 가격이 고가인 내부식성 특수소재를 내면에만 용착시켜 제조 단가를 낮추고, 용접 구조물의 마모 및 부식 등으로 인해 발생하는 손실을 경제적으로 감소시킬 수 있는 방법이다. 이러한 오버레이 용접기술은 산업 전반에 널리 이용되며, 설비의 고도화 및 장수명화가 요구되면서 중요성 또한 점차 부각되어 왔다.[2,4,5]

오버레이 용접은 용접 공정과 더불어 용접 적층의 두께(용접 적층수)를 고려하지 않을 수 없다. 용접 적층 두께에 따라 최종층 표면에서의 희석율에 의한 화학 성분 함량에 영향을 미치기 때문이며, 이는 표면성질(내부식성 등)을 결정 짓는다. 또한 용접부의 성분 함량에 의해 표면 및 소재 내부의 경도에 연관이 있다.[6]

이에 본 연구에서는 적합한 모넬(Monel) 용접 와이어 재료를 선정하고, 탄소강 평판 모재와 파이프 모재의 내면에 선정된 모넬 소재를 오버레이 용접하여 용접 적층수에 따른 영향을 평가하였다. 첫 번째로 평판 오버레이 용접 시편에서 내부식성에 영향을 미치는 적층수에 따른 Fe함량과 모넬 소재와 탄소강 모재의 용착성 측정을 통해 용접성을 검토하였으며, 두 번째로 파이프에 오버레이 용접을 실시하여 적층 부위별 경도와 파이프 내면의 적층별 표면 평탄도를 검토하였다. 이를 통해 본 연구에서는 모넬 오버레이 파이프의 사용 목적에 따른 오버레이 용접 적층수의 결정 방법을 제시하였다.

## 2. 파이프 & 용접재료

### 2.1 파이프 재료

본 연구에서는 파이프 라인에 대한 모넬(Monel)소재 오버레이 용접을 실시하였으며, 사용한 모재는 탄소강 소재인 A216-WCB 파이프이다. Table 1에 A216-WCB에 대한 화학 조성을 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of A216-WCB

C	Mn	P	S	Si
0.30	1.00	0.04	0.045	0.60
Ni	Cr	Mo	Cu	V
0.50	0.50	0.20	0.30	0.03

### 2.2 용접재료

오버레이 용접재료인 모넬(Monel)의 대표적인 합금은 Monel 400이며, Ni 60~70%, Cu 26~34%, 그 외에 소량의 철, 망간, 규소 등을 포함한다. Ni의 내식성을 개량한 것이고, 보통 강보다 강인하며 내식성을 요하는 구조재료로서 용도가 다양하다. Monel 400의 주성분을 Table 2에 나타내었다.

본 연구에 적합한 용접재료를 선정하기 위해 와이어의 송급성 문제나 아크 안정성의 문제 등 여러 가지 항목이 검토되어야 한다. 또한 오버레이 용접을 통한 제조에 있어서 제조 원가는 산업에서 중요한 부분이므로 이를 고려하지 않을 수 없다.

Table 2. Chemical composition of Monel 400

Ni	C	Mg	Fe	S	Si	Cu
63	0.3	2.0	2.5	0.024	0.5	28.0 -34.0

## 3. 용접재료 선정

본 연구를 위한 용접재료를 선정함에 있어 고려되는 항목을 Table 3에 나타내었으며, 이를 통해 최종 용접재료를 선정하였다. Table 3은 최종 용접재료를 선정하기 위한 항목을 나타내고 있다.

Table 3. Evaluation items of wire materials

Evaluation items	Detailed evaluation items
Quality	Wire Chemical composition Cast/Helix etc.
Weldability	Feed rate of wire Arc stability
Wire supply	Deadline of delivery
Price	Price of welding materials

### 3.1 와이어 품질

비교평가 대상으로 선정된 용접재료는 OXFORD사 ALLOY 60과 TECHALLOY사 416의 국외사 2종과 현대중합금속사의 SM-400과 KISWEL사의 KW-M60 국내사 2종이다. OXFORD사와 TECHALLOY사는 미국

시장 및 국내에도 많이 수입 및 판매되고 있는 제품으로 상대적으로 수입 제품 중에서는 가격이 낮아 선정하였다. 국내제품으로는 모넬 용접봉으로 보편적으로 사용되는 SM-400과 KW-M60을 비교평가 대상으로 선정하였다.

비교 평가하는 와이어의 기본적인 특성 및 외관 품질 등을 조사하여 Table 4에 나타내었으며 각 재료는 Fig. 1에 나타내었다.

Table 4. Specification of wire materials as shown in Fig. 1

	HYUNDAI SM-400	KISWEL KW-M60	TECH ALLOY 418	OXFORD ALLOY 60
Size (mm)	1.2	1.2	1.14	1.14
Cast (mm)	700	640	700	745
Helix (mm)	2	8	2	2
Unit weight (kg)	12.5	12.5	15	15

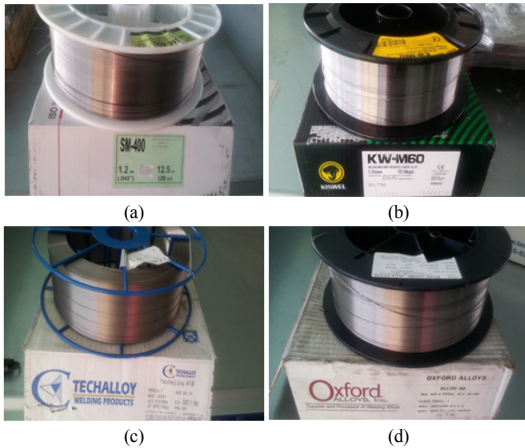


Fig. 1. Photograph of various kinds of wire materials used in this study  
 (a) HYUNDAI SM-400 (b) KISWEL KW-M60  
 (c) TECHALLOY 418 (d) OXFORD ALLOY 60

Fig. 2(a)와 같이 와이어를 몇 가닥 풀어서 바닥에 놓았을 때 와이어 자체 탄성에 의해 형성된 원의 직경을 캐스트(Cast)라 한다. 그리고 캐스트 측정법과 동일하게 바닥에 놓인 와이어의 끝 부분이 Fig. 2(b)와 같이 자체 탄성에 의해 지면과 떨어진 거리를 헬릭스(Helix)라고 한다. 캐스트와 헬릭스는 와이어를 송급 장치에 장착하기 전에 측정을 실시한다.[7] 이는 와이어가 송급되는

과정에서 마찰저항이 높아지고, 용접 팁의 편마모등을 발생시켜 용접에 악영향을 주게 되며, 용접 팁에서 와이어가 비틀리면서 정점지향성(용접 팁에서 인출된 와이어가 일정한 지점을 향해서 인출되는 정도)에 영향을 주는 인자이므로 중점 관리하는 항목이다. 캐스트는 스펴(Spool)의 2~3배 크기가 적당하며 스펴의 직경이 280~300mm인 것을 감안하면 560~900mm범위가 적당하다. 헬릭스의 경우 발생하지 않으면 가장 좋으나 일반적으로 10mm 이내로 관리하고 있다.

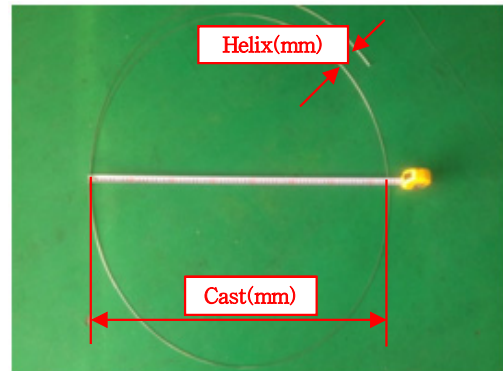


Fig. 2. Measurement of cast and helix of welding wire  
 (a) Cast (b) Helix

Table 5. Chemical composition of Monel wire

	AWS A5.14 ERNiCu-7	HYUNDAI SM-400	KISWEL KW-M60	TECH ALLOY 418	OXFORD ALLOY 60
C	0.15	0.01	0.06	0.05	0.03
Mn	4.0	3.8	3.15	3.41	2.35
Fe	2.5	0.81	0.32	0.12	0.43
P	0.02	0.012	0.012	0.012	0.013
S	0.015	0.001	0.005	0.001	0.002
Si	1.25	0.05	0.35	0.34	0.13
Cu	Rem	31.1	30.7	27.3	31.4
Ni	62.0 ~69.0	62.7	62.9	65.9	63.2
Al	1.25	0.10	0.37	0.14	0.05
Ti	1.5~3.0	1.60	1.63	2.24	1.92

Table 5는 비교대상인 4종의 와이어의 화학성분을 나타내었다.[8]모넬 소재 와이어의 미국용접학회 규격인 AWS A5.14 ERNiCu-7 화학성분과 비교해본 결과 4종 모두 화학성분 규정을 만족하고 있으며, 각 제조사 별로 소폭의 함량 차이는 있으나 규격 범위내에 있는 것으로 나

타났다. 이중금속 용접시 탄소강인 모재와 희석이 되기 때문에 Fe 함량은 가능한 낮은 것이 유리할 것으로 판단되며 HYUNDAI사의 SM-400의 와이어가 타사대비 상대적으로 높게 나타났다.

### 3.2 와이어 용접성 평가

와이어 용접성을 평가하기 위해 송급성 평가, 아크안정성 평가, 와이어의 공급 및 가격에 대하여 연구를 수행하였고 그 결과는 Table 8에 나타내었으며 각 항목별 연구내용은 다음과 같다.

#### 3.2.1 송급성 평가

이중금속 용접은 장시간 연속용접이 되기 때문에 일정하게 와이어가 송급되어야 한다.

와이어 송급성을 평가하는 방법으로 Fig. 3과 같이 5m의 와이어 송급 케이블을 ‘Straight’, ‘W’, ‘2Turn’의 형태로 인위적으로 송급 저항이 심하도록 유도하여 토치 선단에서 아크가 지속적으로 발생하는지 평가하였다.

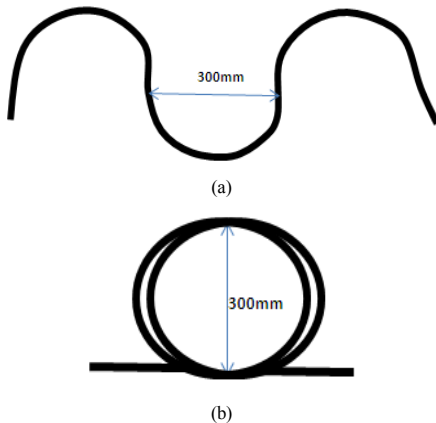


Fig. 3. Wire shapes for comparison of feed rate  
(a) Shape of ‘W’ (b) Shape of ‘2turn’

용접은 원통형태의 회전하는 모재위에 용접을 실시하고 아크 지속여부를 평가하였으며, 용접에 사용된 용접 조건은 Table 6과 같다.

Table 6. Welding condition of evaluation for feed rate

Process	Current (A)	Voltage (V)	Shield gas (%)	Flow rate (L/min)	Welding M/C
GMAW	180-190	26-28	Ar 100	25	Oerlikon citoplus 420

#### 3.2.2 아크안정성 평가

모재에 직선 용접을 하는 과정에서 용접 과정을 채취하여 1초간의 단락이행이나 정상단락, 용접전류 및 전압 편차 등을 컴퓨터 시스템 상으로 분석하였다.

Fig. 4는 KISWEL사의 KW-M60의 파형을 나타내고 있으며 (a)의 측정파형과 (b)의 확대 사진에서와 같이 전류와 전압의 변동 폭이 일정하고 안정적임을 알 수 있다.



Fig. 4. Waveform of the current and voltage  
(a) Pulse waveform for comparison analysis  
(b) Distended pulse waveform

### 3.3 용접 와이어의 가격적 측면

이중금속 용접에서 중요한 사항은 제조 원가이며, 모넬 소재를 이용해서 제조되는 파이프대비 품질 안정 효과 외에 원가 절감이 있어야 상용화 하는데 유리하다. 그래서 용접재료의 가격은 순수하게 제조원가로 반영되기 때문에 품질 확보되는 범위 내에서는 가능한 가격적인 부분도 경쟁력이 있는 것이 유리하다. Table 7에 각 용접 재료의 단가를 나타내었다.

Table 7. Price of welding wire materials used in this study

Product names	HYUDAI SM-400	KISWEL KW-M60	TECH ALLOY 418	OXFOED ALLOY 60
Price (KRW /per kg)	52,000	52,000	61,000	63,000

### 3.4 용접 와이어 선정

4종의 용접재료에 대한 용접성 평가 결과는 Table 8에 정리하여 나타내었다.

송급성은 ‘Straight’ 및 ‘W’ 조건에서는 4종의 와이어가 대등하였으며, 저항성이 강한 조건인 ‘2Turn’에서 미세한 아크 불안정도의 차이가 관찰되었다. 상대적으로 KISWEL 제품이 안정된 공급 특성을 나타내었다.

앞서 평가한 4가지 항목을 근거로 본 연구에서는 KISWEL KW-M60 와이어를 최적의 와이어라 판단되어 본 연구의 오버레이 용접 와이어로 선정하였다.

Table 8. Result for evaluation of wire weldability

Item	Feed ability			Arc stability		
	Straight	W	2Turn	Incomplete short-circuit	Standard deviation of current and voltage	Coefficient of variation
Wire						
HYUNDAI SM-400	◎	◎	○-◎	◎	◎	○
KISWEL KW-M60	◎	◎	◎	◎	◎	◎
TECH ALLOY 418	◎	◎	○	◎	◎	◎
OXFORD ALLOY 60	◎	◎	○	◎	◎	◎

◎ Good    ○ Usual    △ Inferiority

## 4. 오버레이 적층 수에 따른 영향

### 4.1 탄소강 평판에서의 오버레이 용접

앞서 고찰 후 선정된 KISWEL KW-M60 와이어 소재를 모재인 탄소강소재(A216-WCB)에 오버레이 용접이 가능한지 확인하고 용접을 위한 최적조건을 설정하기 위해 평판의 탄소강 모재에 모넬 소재를 적층 용접하여 평가를 실시하였다.

용접 프로세스는 MIG(Metal Inert Gas) 용접으로 진행하였으며 Fig. 5 (a)와 같이 평판의 모재에 용접을 진행하였다. 이와 같이 용접한 시험편은 Fig. 5 (b)와 같다.

시험편에 용접을 3Layer로 적층을 한 이유는, 일반적으로 MIG 용접의 희석율이 20~45%로 알려져 있으므로 모넬 소재 용접시 희석으로 인한 용착금속 최종층의 Fe 함량이 중요한 요인이 되기 때문이다. Fe함량이 5% 이

상이면 내부식성에 영향을 미치며 용접금속과 모재간의 용착층에도 작용하기 때문에 5%이하로 조절하는 것이 중요하다.[3] 따라서 탄소강 모재에 모넬 소재 용접시 이론적으로는 3Layer를 용접해야 최종 층에서의 모넬 소재의 화학성분을 만족할 수 있을 것으로 사료되기 때문이다.

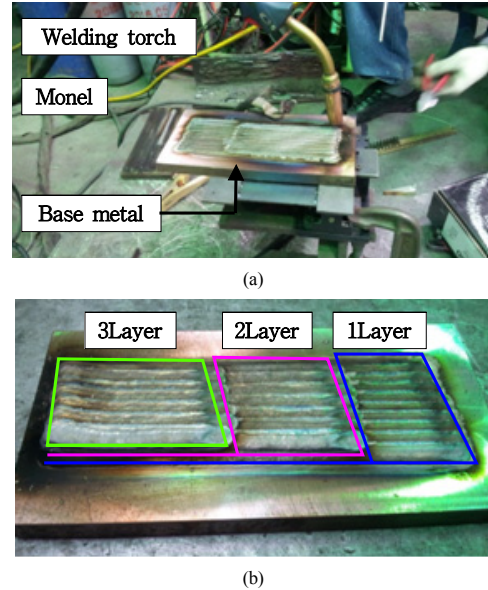


Fig. 5. Monel welding to carbon steel plate  
(a) Welding to plate  
(b) Finished specimen of plate welding

### 4.2 오버레이 적층 수에 따른 Fe 함량

모넬 용접 금속의 희석율(Fe함량)을 알아보기 위해 용접 시험의 1Layer에서 3Layer(최종층)까지 각각 칩(chip)시료를 채취하여 화학성분을 확인하였다.

각각 5개의 시료를 채취하여 분석하였으며, Fig. 6에 그 결과를 나타내었다. Fig. 6 (a)에서 1Layer, 2Layer, 3Layer의 Fe함량을 각각 찍은 선으로, 평균값을 점선으로 나타내었다. 우선 1Layer와 2Layer의 경우, 모재(탄소강) 표면부와 모넬 소재의 희석율이 높아 Fe함량이 각각 평균 14.84%, 9.82%로 기준 함량보다 높게 측정되었다. 이와 비교하여 3Layer의 경우 평균 2.44%로 규정 함량 5% 이하로 만족하는 것으로 나타났다. 이는 용접시 희석율을 고려하여 만족하는 Fe함량을 얻고자 한다면 용접 적층은 최소 3Layer로 적층을 하여야 한다는 것을 알 수 있다.

모넬 소재는 Ni의 내식성을 개량한 Ni과 Cu의 합금이다. 따라서 Cu의 함량이 매우 중요하며 통상 25~34%의 함량을 가져야 한다. 때문에 Cu함량 또한 만족하는 결과를 나타내어야 하므로, Fig. 6 (b)에 Cu함량을 나타내었다. 비교를 위하여 사용된 모넬 소재의 Cu함량을 점선으로 표현하였다. 1Layer, 2Layer에서는 Cu함량이 각각 22.64%, 24.39%로 초기 모넬 소재의 Cu함량 31.4%보다 현저히 감소하였다. 이에 반하여 3Layer의 경우 25.49%로 초기소재에 비해 감소하였지만 통상적인 기준치에 만족하는 결과를 보였다.

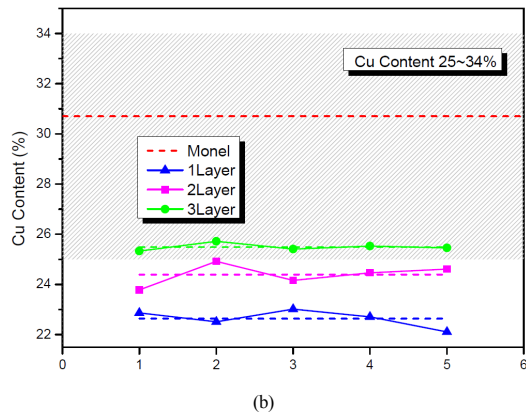
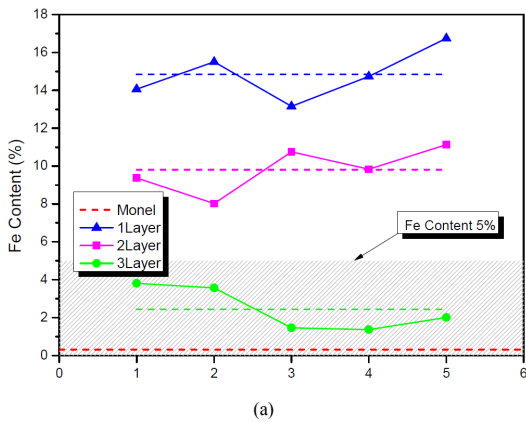


Fig. 6. Graph of Fe and Cu contents of welding parts according to the number of the layers (a) Fe content (b) Cu content

### 4.3 용접금속의 용접성 평가

용접된 모넬 소재와 탄소강 모재간의 접합정도를 평가하는 방법으로 모재위에 용접된 금속을 Fig. 7과 같이 측면 밴딩 시험을 통해 강도나 박리 정도를 확인하였다. 밴딩 시험편은 각각 층별로 4개씩 채취하여 측면 2개 방

향으로 2개씩 밴딩하여 관찰하였으며, 육안 관찰 및 현미경 관찰을 통해서 크랙의 크기도 측정하였다.

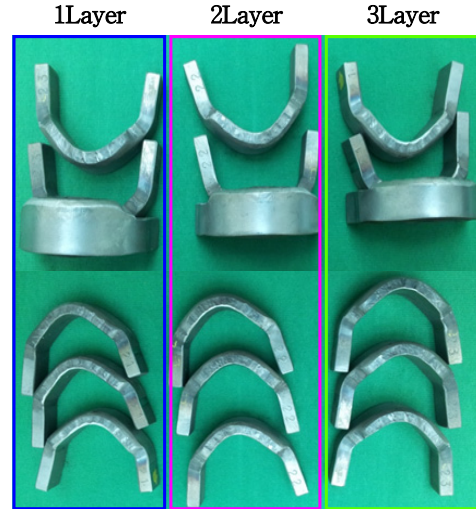


Fig. 7. Specimen of bending tests

결과는 Table 9에 나타내었으며, 관찰결과 1Layer 1-2/1-4 시험에서 크랙이 관찰되었다. 1Layer에서 크랙이 관찰된 것으로 보아 Fe함량과 관련이 있는 것으로 사료되며, 이는 비드와 비드 사이의 경계부에서 발생한 것으로 보아 비금속 계재물 등의 혼재에 의한 것으로 사료된다.

Table 9. Result of bending tests

Weld layer	Test ID	Bending direction	Result	Note
1 Layer	1-1	Left	Accept	No crack
	1-2	Left	Not Accept	∅0.48mm crack
	1-3	Right	Accept	No crack
	1-4	Right	Not Accept	∅0.21mm crack
2 Layer	2-1	Left	Accept	No crack
	2-2	Left	Accept	No crack
	2-3	Right	Accept	No crack
	2-4	Right	Accept	No crack
3 Layer	3-1	Left	Accept	No crack
	3-2	Left	Accept	No crack
	3-3	Right	Accept	No crack
	3-4	Right	Accept	No crack

크랙이 발생된 부분을 현미경으로 관찰한 결과 Fig. 8 과 같이 나타났으며, 각각 크랙의 크기를 측정하였다. 크랙의 크기는 0.48mm와 0.21mm로, 1Layer 시편은 밴딩 시험결과 크랙 발생으로 적용될 수 있음을 알 수 있다. 2Layer 이상의 적층수에는 모델 소재와 탄소강 모재 용접 시편의 용착성이 양호한 것으로 생각되며, 본 연구에서 적용된 A216-WCB 탄소강 모재에 KISWEL KW-M60 모델 재료의 용접이 가능할 것으로 판단된다.

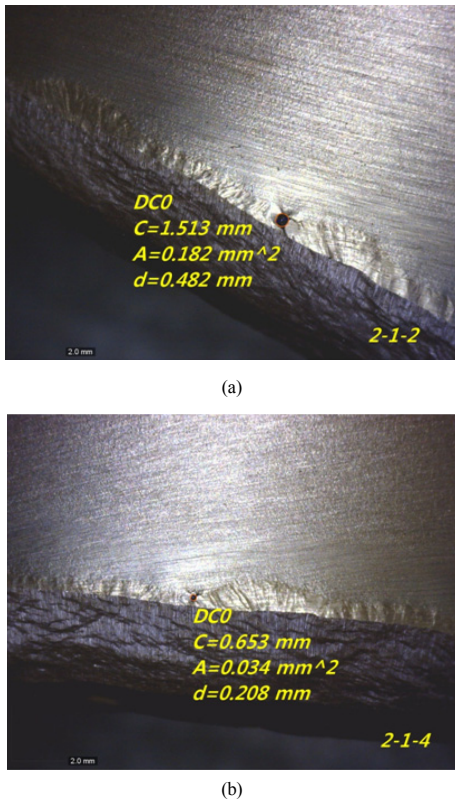


Fig. 8. Crack of bending specimens  
 (a) Test ID : 1-2 Specimen (Crack diameter:  $\varnothing$  0.48mm)  
 (b) Test ID : 1-2 Specimen (Crack diameter:  $\varnothing$  0.21mm)

## 5. 파이프 오버레이 용접

### 5.1 탄소강 파이프에서의 오버레이 용접

평판의 모재에 용접한 시편을 바탕으로 탄소강 파이프에 오버레이 용접을 실시하고 평가하기 위하여 오버레이

용접을 파이프에 적용하였다.

내식성을 요구하는 배관 설비에 주로 사용되는 오버레이 용접 기술은 용접 특성상 일반 배관 설비와 달리 용접 비드로 인한 내면형상과 더불어 표면의 성질 향상을 고려해야 한다. 또한, 앞서 검토한 용접에 의한 희석 및 용착성도 고려해야 한다. 따라서 Fig. 9와 같이 원형 파이프에 오버레이 용접을 통해 시편 내면의 성질 및 비드 형상 평가를 실시하였다. 시험편은 평판 시험편과 동일하게 MIG용접으로 진행하였으며, 3개의 층으로 용접을 실시하였다.

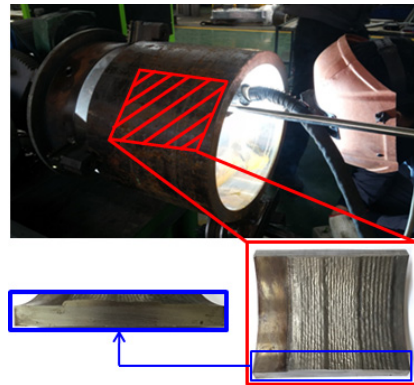


Fig. 9. Overlay welding of pipe specimens

### 5.2 Micro Vickers 경도측정

Fig. 10은 원형 파이프의 탄소강 모재에 앞서 선정된 모델 소재를 용접한 시편이다. 각 층별 용접부와 모재의 경도를 측정하였으며 그 결과는 Fig. 11에 나타내었다. 1Layer에서 모재와 모델 소재의 용접에 의해 HAZ(Heat Affected Zone)부가 발생하여 평균 204.8Hv로 가장 높은 경도를 보였으며, 이는 모재와 오버레이 층간의 경계면은 모재 일부가 용융된 후 응고하면서 형성되어 견고하게 결합된 것을 알 수 있다.[2] 하지만 적층수가 증가할수록 경도가 감소하는 것으로 나타나 경도의 측면에서 오버레이 적층 수를 고려해야할 것으로 보인다.



Fig. 10. Specimen of pipe overlay welding

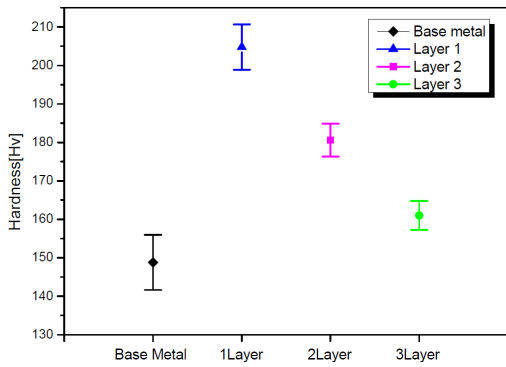


Fig. 11. Result of micro vickers hardness according to the number of the layers

### 5.3 표면 평탄도 측정

오버레이 용접된 파이프의 경우 일반 파이프와 달리 내면의 용접 비드로 인해 내면이 고르지 못하다. 통상 내면의 표면 거칠기에 대한 규정이 없으나, 파이프의 품질을 고려하면 비드 외관의 평탄도를 적정 수준으로 확보하는 것이 필요하다. 따라서 오버레이 용접된 시험편의 평탄도 표준편차를 검토하기 위해 용접 비드 높이 측정을 실시하였다.

Fig. 12와 같이 3Layer로 적층된 시험편을 모재에서 용접 비드까지 각 층별로 측정하였으며, 비드 높이는 측정된 용접 시험편의 높이에 모재 높이를 제외하여 도출하였다. 측정된 시험편의 용접 높이와 비드 높이, 그 평균값과 표준편차를 Fig. 13, 14에 나타내었다.

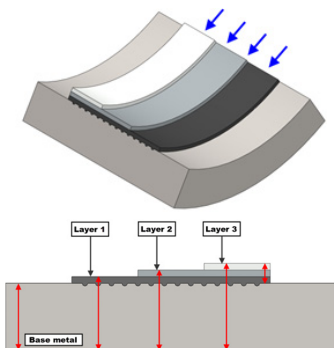


Fig. 12. Schematic illustration of bead height measurement

각 적층별로 용접된 비드 높이의 평균은 1Layer 2.67mm, 2Layer 5.97mm, 3Layer 9.00mm로 측정되었으며, 측정된 값을 토대로 각 적층별 비드면 평탄도 표준

편차를 검토해본 결과 0.1~0.2로 비드별 높이 편차가 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 3Layer에서 편차가 급격히 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 적층수가 증가할수록 이전 적층에 의한 영향으로 비드 편차가 발생하는 것으로 사료된다.

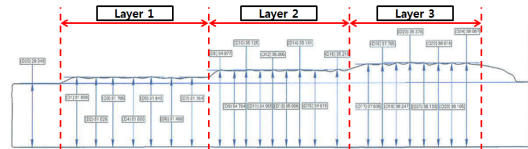


Fig. 13. Result of bead height measurement

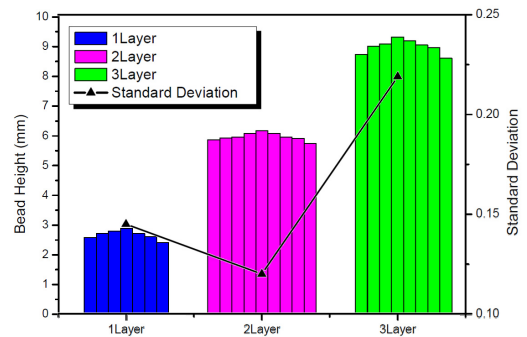


Fig. 14. Graph of bead height and standard deviation

## 3. 결론

본 연구에서는 모넬 소재의 오버레이 용접을 통해 적층수에 따른 Fe함량, 적층 부위별 경도 그리고 파이프 오버레이 용접에서의 표면 평탄도를 측정하여 적층수에 따른 각각의 특징을 알아보았으며, 그에 대한 결과는 다음과 같다.

- 1) 용접부 Fe함량은 3Layer에서 5%이하인 2.44%로 측정되었으며, 이는 용접부 내부식성 측면에서 최소 3Layer 이상 적층하여야 적합한 것으로 나타났다.
- 2) 경도의 측면에서는 1Layer의 모재와 모넬 소재 오버레이 경계층간 경도가 204.8Hv로 가장 높게 측정되어 모재와 오버레이 층간에 견고하게 결합이 된 것으로 보였으나, 적층수가 증가할수록 경도가 감소하였다.



- 3) 표면 평탄도의 경우 각 적층별 비드 표준편차의 값은 0.1~0.2로 비드 편차가 크지 않은 것으로 나타났지만 3Layer에서 편차가 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.

이와 같은 결과로 모넬(Monel)-Clad 파이프 오버레이 용접 시 고려해야할 사항은 다음과 같다.

- 1) 오버레이 용접 시 내부식성 측면(Fe함량)에서 고려할 경우 최소 3Layer 이상 적층하여야 약 5%이하의 Fe함량을 만족할 수 있다.
- 2) Monel소재는 탄소강에 비해 상대적으로 경도가 약하므로 적층수가 증가할수록 경도가 감소하게 된다. 따라서 경도의 측면에서 고려할 경우 다른 요인들과 함께 고려하여 적층수를 선정하여야 한다.
- 3) 비드 평탄도는 용접 적층수가 증가할수록 이전 적층에 의한 영향에 의해 비드 편차가 많이 발생하므로 용접 적층수가 증가함에 따라 이를 주의 깊게 고려해야 한다.

이는 사용자의 오버레이 용접 파이프의 사용처에 따라 적합한 용접 적층수를 선정할 수 있을 것으로 사료된다.

## References

- [1] M. J. Moradi, M. Ketabchi, "An Experimental Study of Microstructure and Mechanical Behavior of Alloy 625 Weld Overlay Deposited on ASTM A516 Grade 70", *Indian Journal of Science and Technology*, 8, 12, pp.1-6, Jun. 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i12/70725>
- [2] E. R. Baek, J. Y. Jung, S. H. Ahn, "Trend of the Weld Surfacing Technology", *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, 15, 5, pp.11-20, Oct. 1997.
- [3] P. Elango, S. Balaguru, "Welding Parameters for Inconel 625 Overlay on Carbon Steel using GMAW", *Indian Journal of Science and Technology*, 8, 31, pp. 1-5, Nov. 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i1/84309>
- [4] H. C. Yoo, "Recent Study of Overlay Welding on Welding methods", *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, 31, 1, pp. 11-20, Dec. 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5781/KWJS.2013.31.1.11>
- [5] Y. R. Kim, H. B. Chae, J. W. Kim, "Welding Heat Source Modeling for Heat Flow Analysis of GTA Overlay Welding", *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, 31, 4, pp. 62-66, Jul. 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5781/KWJS.2013.31.4.62>

- [6] Y. Bhambri, V. K. Sikka, L. R. Walker, M. L. Santella, G. Muralidharan, J. W. Hales, "Al Enrichment of Carbon Steels through Weld Overlay Process for Improved Oxidation Resistance", *Materials Science and Engineering A*, 394, 1-2, pp. 249-255, Mar. 2005.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2004.11.024>
- [7] National Standard, Premium Welding Wire Technical Bulletin-Wire Cast & Helix, National Standard, 2014, Available From:  
<http://www.nationalstandard.com/wp-content/uploads/2014/06/NS-Catalog-Wire-Cast-and-Helix.pdf>. (accessed May, 2016)
- [8] Korea Testing & Research Institute report.

## 최 혁(Hyeok Choi)

[준회원]



- 2016년 2월 : 동아대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 대학원 기계공학과 박사과정

<관심분야>  
기계, 재료

## 박 준 흥(Joon-Hong Park)

[정회원]



- 1997년 2월 : 부산대학교 대학원 정밀기계공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 부산대학교 대학원 정밀기계공학과 (공학박사)
- 2004년 10월 ~ 2012년 2월 : 동아대 신소형제센터 연구교수
- 2012년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 조교수

<관심분야>  
기계, 재료