

## 원전기기의 인코넬 오브레이 용접

정인철·심덕남·변진귀

### Overlay Welding of Inconel Material for Nuclear Power Components

In Chul Jung, Deog Nam Shim and Jin Gui Byun

#### 1. 서론

인코넬 합금은 내부식성과 고온에서의 우수한 기계적 특성으로 원전 압력기기의 주요 재료로서 사용되고 있다. 초기에는 오브레이 용접에 600합금 소재가 사용되었으나 장기간 운전 후 발생하는 응력부식에 의한 균열 손상을 방지하기 위해 점차 690합금으로 대체되었다. 690합금은 크롬 함유량을 증가시켜 반연속적인 입계 탄화물에 의해 응력 부식균열의 저항성을 향상시킨 소재이다. 690합금 용접금속은 고온균열에 민감하고 기공, 용입불량 등의 결함이 발생하기 쉽다. 특히 연성저하 응고구간에서 발생하는 연성저하균열(DDC: Ductility Dip Cracking)결함에 민감하여 이를 방지하기 위해서는 적절한 시공 조건의 설정과 용접 재료의 선택이 중요하다.

인코넬 오브레이의 용접 프로세스는 주로 아크 용접이 사용되고 있으며 용착효율이 높은 스트립 용접 이외에 최근에는 자동화된 고능률 가스텅스텐 아크용접(GTAW) 등 고품질 용접의 적용이 확대되고 있다. 또한 인코넬 오브레이는 원전기기의 수명연장을 위한 예방 용접에도 적용된다. 이 경우에는 690합금 소재를 사용한 텀퍼비드 기법이 요구되며 코드 요건에 따른 이종재질 간의 공정절차 확립이 필요하다.

#### 2. 본론

##### 2.1 인코넬 용접 특성

인코넬 용접은 고 청정도 유지 용융금속의 저 유동성, 얇은 용입 등의 특성을 갖고 있다. 용접 구역은 고 청정도가 요구되며 두꺼운 산화물이나 인 황, 납 등의 취화원소에 유의해야 한다. 니켈 용융금속은 유동성이 낮아 고 진류하에서는 기공 결함을 가지므로 용접 시 와이어 직경의 3배 이내로 워빙 기법을 적용한다.

니켈 합금의 용접부는 연강이나 스테인리스강에 비해 용입 깊이가 얇다. 용접 개선면 각도는 일반 V 이음부에서는 10~20° 더 크게 하고 루트면은 1.6mm 정도로 적게 한다. 필렛 형태에서 용접비드는 일반 용접과는 달리 약간 볼록한 형태가 결함 방지에 유리하며 이것은 잔류응력에 의한 응력 집중을 완화시켜 균열에 대한 민감성을 낮추게 한다.

690합금은 Ni-Cr-Fe계의 고용강화형 합금으로 완전한 오스테나이트 조직을 갖고 있다. 용접부는 균열에 민감하므로 용가재는 불순물이 적고 연성저하균열 저항성이 높은 재료를 선택해야 한다. 산화된 불순물로 이루어진 용융부의 부유물은 오염된 비드 표면을 형성하므로 매 층간 크리닝에 유의한다.

##### 2.2 오브레이 용접 시공

인코넬 오브레이 용접은 원전기기의 튜브시트, 주기기 노즐 등에 적용된다. 주로 적용하는 용접 프로세스는 서브머지드 아크 스트립 오브레이, 일렉트로 슬래그 스트립 오버레이, 가스텅스텐 아크용접 및 수동용접(SMAW) 등이 있다.

###### 2.2.1 스트립 오브레이 방법

서브머지드 아크 스트립 오브레이와 일렉트로 슬래그 스트립 오버레이는 스트립 와이어 형태의 용가재와 플럭스를 사용한다. 아래보기 자세에서 용접되므로 단 시간에 많은 용착량을 얻을 수 있고 용접부 품질도 비교적 양호하다. 그림 1은 각 스트립 오브레이에 대한 용융원리를 도시한 것이다.

서브머지드 아크 스트립 오버레이는 아크 열에 의해 스트립과 모재가 용융되며 스트립의 한 점에서 아크가 발생하여 순간적으로 폭 방향으로 이동하면서 전면이 용융된다. 그림 2와 같이 일렉트로 슬래그 스트립 오버레이는 고 전도성을 갖는 플럭스의 발열로서 모재와 스

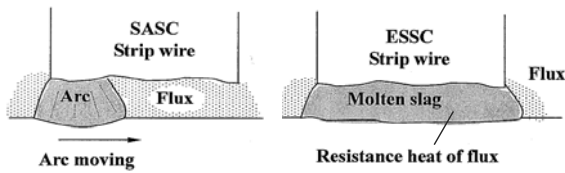
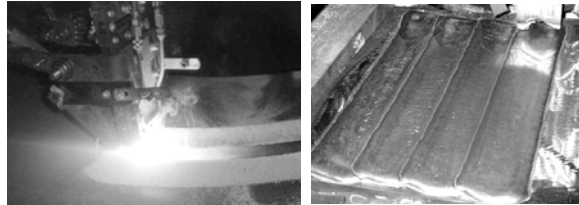


Fig. 1 Schematic comparison of strip overlay



(a) Overlay welding (b) Bead appearance

Fig. 2 Electro slag strip overlay process

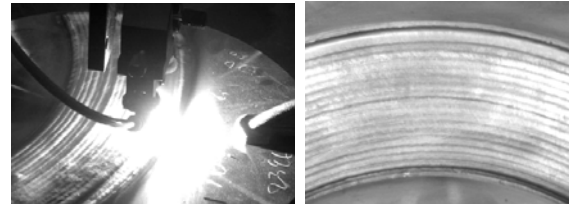
트립을 용융시키며 모재와의 희석률이 낮고 60mm 이상 광폭의 스트립 사용 시에도 안정된 용접이 가능하다

용접 시공조건은 스트립의 폭 요구되는 각 층의 두께에 따라 적절히 조정한다 서브머지드 아크 스트립 오버레이는 스트립 폭이 60mm의 경우 전류 700~900A, 용접속도 10~15cm/분, 초층 예열 및 층간온도는 약 170℃를 유지한다. 비드 간은 6~10mm 중첩시키며 비드의 두께는 4~5mm를 갖는다. 일렉트로 슬래그 스트립 오버레이는 동일한 스트립 폭에서 전류 1000~1200A, 용접속도 15~18cm/분으로서 서브머지드 아크 스트립 오버레이 보다 높은 용착률을 가질 수 있다.

2.2.2 가스텅스텐 아크용접 오브레이 방법

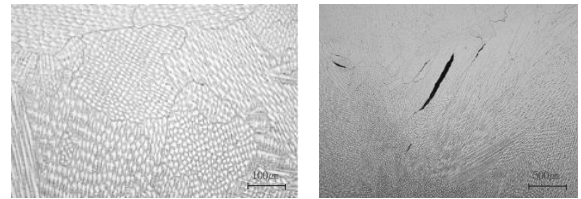
용접 시 플럭스를 사용하지 않으므로 불순물의 혼입이 최소화되고 용접부의 입열 제어가 용이하다 정밀 오브레이 용접이 요구되는 노즐 부위에 주로 적용되며 결함 발생에 민감한 690합금에는 가장 적절한 용접 방법이다.

용착 효율을 높이기 위한 핫와이어 기법은 용가재인 와이어를 용융지에 도달하기 전에 자동 와이어 공급 장치에 부착된 별도의 전원으로 예열하여 용착량을 증가시킨다. 그림. 3과 같이 직선(Stringer)비드의 용접 전류는 200~250A를 사용하며 위브(Weave)비드는 전류를 100A 정도 높이고 용접속도를 낮춘다 핫와이어 전류는 아래보기 자세에서 50~80A 정도까지 사용할 수 있으며 위브를 하여 비드 폭을 크게 할 수 있다



(a) Overlay welding (b) Bead appearance

Fig. 3 GTAW overlay process



(a) Weld metal (b) Typical micro crack

Fig. 4 Microstructure of Alloy690 weld

2.2.3 오브레이 용접부 평가

오브레이 용접부는 굽힘시험, 성분분석 및 조직시험 등을 통하여 공정 절차를 검증한다 690합금 용접부는 모재와의 경계부에 생기는 조립구역과 열처리 후에 오브레이 층으로 탄소 확산에 의한 탄소 과다층이 형성될 수 있다. 다층 용접의 경우 중첩되는 층에 의한 재결정 효과로 세립구역이 나타난다

용접부의 건전성은 PT, UT 등의 방법으로 확인하며 고온균열과 같은 미세한 균열이나 불순물 혼입 표면부 산화, 기공 등의 결함에 유의한다

시공조건을 설정하기 위한 시험에 있어서 용접 입열은 변수를 선정하는 주요소로서 용접 길이 당 부가되는 열량을 의미한다 가스텅스텐 아크용접의 경우 용가재를 별도로 공급하므로 동일한 열량이라도 용가재 공급량에 따라 부가되는 입열이 다르다 이러한 점을 고려하여 전력율(Power ratio)과 에너지 밀도(Energy density) 개념이 도입되었다

전력율은 단위 길이당 공급되는 용가재에 부가되는 전력량으로서 와이어 송급량을 증가시키면 낮아진다 전력율이 낮으면 희석율은 감소되나 용입부족과 같은 결함 발생 확률이 높아진다.

$$Power\ ratio = \frac{Amperage \times Voltage}{\left[ \frac{Wire\ feed\ speed}{Travel\ speed} \times Cross\ sectional\ area\ of\ wire \right]}$$

에너지 밀도는 용가재 단위 부피당 사용하는 에너지로서 수치가 크면 가열 에너지가 증대함을 의미한다 이러한 개념을 고려하여 용접부 요구 특성에 맞는 시공 조건을 설정할 수 있다

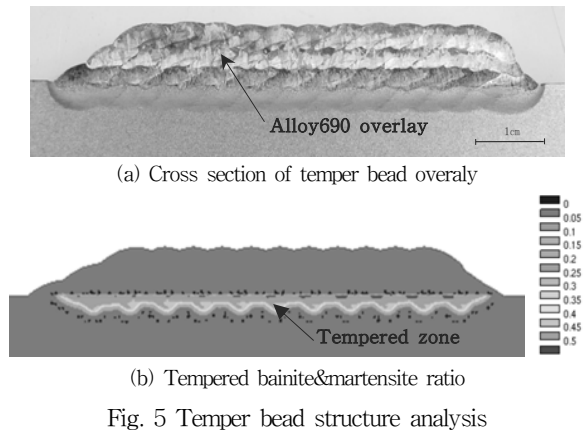


Fig. 5 Temper bead structure analysis

### 2.3 템퍼비드 오브레이 기법

응력부식 균열을 예방하기 위한 오브레이는 이중 용접부를 형성하는 원전기기의 노즐 및 배관부에 적용된다. 배관 외면에 일정 두께만큼 오브레이 용접을 하여 배관 루트부에 인장응력을 압축응력으로 개선시킴으로써 응력 부식균열에 의한 결함 예방 뿐만 아니라 기존의 결함 성장을 억제한다.

템퍼비드 오브레이 기법은 다층 용접에 있어서 이전의 용접층 및 용접 열영향부에 금속학적인 템퍼링 효과를 주기 위해 이전 용접표면에 용접하는 것이다.

원전기기의 이중용접부는 저합금강, 스테인리스강 및 인코넬 재질로 구성되어 있다. 템퍼비드 용접은 코드 요건 상 요구되는 저합금강 부위에 대한 용접 후열처리가 면제될 수 있다. 690합금의 템퍼비드 오브레이는 요구되는 경도치 및 물성을 갖기 위해 각 층별 적절한 용접조건을 설정해야 한다. 특히 고온균열 등 결함 발생에 민감하므로 첫 층의 용접조건이 중요하다. 페라이트계 재질의 용접 초층에서는 크롬 함량의 요구 조건을 만족해야 하므로 희석을 제어가 필요하다. 템퍼 비드 오브레이는 입열량 제어가 용이한 자동화 장치를 이용하여 수행한다.

용접 시험변수는 입열 및 전력을 고려하여 전류와 전압, 용접속도, 용가재 공급속도를 결정한다. 템퍼비드 오브레이 용접을 실 제품에 적용하기 위해서는 용접 장치 및 공정 설계 최적 용접조건 설정, 용접부에 대한 해석이 요구된다.



- 정인철(鄭仁徹)
- 1959년생
- 두산중공업 기술연구원
- 용접공정, 자동화 및 고에너지용접
- e-mail : inchul.jung@doosan.com



- 심덕남(沈德男)
- 1968년생
- 두산중공업 기술연구원
- 용접자동화, 고정밀 제어용접
- e-mail : deognam.shim@doosan.com



- 변진귀(卞鎭貴)
- 1969년생
- 두산중공업 기술연구원
- 오브레이용접, 레이저용접
- e-mail : jingui.byeon@doosan.com

## 3. 결 론

원전기기의 표면에 오브레이 목적으로 사용되는 인코넬 용접은 고 청정도 유지 저 유동성 얇은 용입 등의 용접 특성을 갖고 있다. 특히 690합금은 고온균열, 불순물 혼입, 기공 등의 결함 민감성이 높으므로 시공조건 설정과 용가재 선택에 유의해야 한다.

용접프로세스는 스트립 방법과 텅스텐 아크용접가 자동화 형태로 주로 사용되며, 수동용접 등의 아크 용접도 적용할 수 있다. 입열은 양호한 용접부를 얻기 위한 시공 조건설정에 주요한 요소로서 텅스텐 아크용접은 와이어 송급량에 따른 전력을 개념을 적용할 수 있다.

템퍼비드 오브레이 기법은 응력부식 균열을 예방하기 위한 것으로, 다층 용접을 통해 템퍼링 효과를 줌으로써 후열처리 효과를 갖는다.

인코넬 오브레이는 용접특성과 시공방법에 대한 이해와 적절한 용접장치 및 공정설정을 통해 양호한 용접부를 얻을 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. R. Smith, G. Frederick: Experience with Hot Cracking in Alloy52M Overlays, EPRI 8th International Conference on Welding & Repair Technology (2008),
2. D. Wadkey: Mitigation Weld Overlay for Dissimilar Metals Welds containing Alloy 82/182 on the North Anna Unit2 Pressurizer, EPRI Conference (2007), 918-941
3. S. D. Kiser, E. B. Hinshaw: Nickel Alloy Welding Requirements for Nuclear Service, Focus on Nuclear Power Generation (2005), 21-25