

# 일렉트로슬래그 클래딩으로 그물망 용접조직을 갖는 새로운 420계 스테인리스강 스트립재의 질소함량과 냉간압하량에 따른 기계적 특성 변화

정재영\*<sup>†</sup>

\*경북대학교 자동차부품소재연구소

## The Effects of Nitrogen Content and Cold Rolling Reduction on the Mechanical Properties of New 420-series Stainless Steel Strip having a Mesh As-Welded Structure by the Electroslag Cladding

Jae-Young Jung\*<sup>†</sup>

\*Automobile Parts & Materials Research Center, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : jaeyjung7@gmail.com

(Received August 10, 2017 ; Revised September 18, 2017 ; Accepted September 26, 2017)

### Abstract

In this study, we investigated the mechanical properties of new 420 stainless steel strips as a function of nitrogen content and cold rolling reduction. Also, the results of the tensile and thermal fatigue tests using electroslag cladding specimens under a given welding condition were as follows. As-welded structures in which the delta ferrite is present in the form of a mesh are obtained in the alloy composition range in which about 5% delta ferrite is present in the Schaeffler diagram based on Cr equivalent and Ni equivalent. The softening temperature of new 420 stainless steel alloy designed as a mesh as-welded structure was determined to be 680-730 °C as a result of using cold rolled steel at 10-90% reduction. The ratio of 600 °C to room temperature tensile yield strength of weld metal was ~0.37 for the lowest N specimen and ~0.485 for the highest N specimen. However, high temperature ductility deteriorated with increasing N content. The presence of welding beads between the weld metal also reduced the elongation at room and high temperature rather than yield and tensile strength. The thermal fatigue characteristics are almost equal or better than those of the same materials prepared by the submerged welding method.

Key Words : Electroslag cladding, New 420-series stainless steel strip, A mesh as-welded structure, Martensite stainless steel overlay, Cold rolled strip

### 1. 서 론

본 연구에서는 용착금속상태에서 그물망 용접조직을 갖도록 합금설계된 420계 스테인리스강 스트립재를 개발하기 위하여 열간 및 냉간성형성과 질소 함량에 대한 효과를 중심으로 용접재료를 연구하였다. 일렉트로슬래그 클래딩 공정<sup>1-3)</sup>(Electroslag Cladding Process)은 대형구조물의 접합에 주로 이용되는 일렉트로슬래그 용접법<sup>4)</sup>을 산업구조물의 표면피복에 적합하게 응용한 오

버레이 용접공정이다. 이 오버레이 공법은 스트립을 전극재로 이용하는 서버머지드 아크 클래딩 공정<sup>5)</sup>(Submerged Arc Cladding Process)과도 매우 유사하다. 그러나 이들 공법간의 차이는 모재의 용입과 전극재와 플럭스의 용융을 발생시키는 방법에 있다. 일렉트로슬래그 클래딩 공정은 전도성의 용융 슬래그를 통하여 흐르는 전류에 의한 저항열로부터 필요한 열을 얻는 반면에 서버머지드 아크 클래딩법에서는 전기적인 아크열에 의해 필요한 열량을 공급받는다. 또한 이러한 차이로 일렉트로슬래그 클래딩법은 저항열을 이용하므로 다른 오버레

이 용접법에 비해 용착물/희석물의 비가 매우 높기 때문에 매우 효율적인 오버레이 공법으로 알려져 있다.

특히 저가 탄소강이나 합금강을 모재로 하여 오스테나이트계 스테인레스강<sup>6-9)</sup>이나 듀플렉스 스테인레스강<sup>10)</sup>을 표면에 강화하여 저비용으로 고급 성능을 구현하는 경우에 많이 사용된다. 상대적으로 페라이트계나 마르텐사이트계 스테인레스강으로 클래딩하는 연구논문은 다소 드물다.

본 연구에서는 주로 연속주조기의 핵심부품으로 사용되는 연주 가이드롤의 오버레이 용접에 마르텐사이트계 스테인레스강을 일렉트로슬래그 클래딩용 스트립재를 확보하기 위한 대량생산 가능성을 연구하게 되었다. 특히 용착금속상태에서 그물망 용접조직을 갖도록 합금설계된 새로운 420계 스테인레스강 스트립재를 개발하기 위하여 열간 및 냉간성형성과 질소 함량에 대한 효과를 중심으로 용접재료를 연구하였다. 그리고 시제조된 스트립재를 일렉트로슬래그 클래딩하여 인장특성 및 열피로 특성을 평가하여 기존 잠호용접법에 의한 오버레이 재와 비교분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 합금잉곳 준비 및 열간·냉간 압연시험

본 연구에서는 델타-페라이트 분율과 Cr/Ni 당량에 대한 깊은 이해를 바탕으로 그물망 용접조직을 갖도록 합금설계된 내열용 스테인레스강 합금의 화학성분을 기준으로 3종의 스테인레스강이 진공유도용해로에서 25kg의 잉곳으로 제조되었다. 이들 주조체는 N을 0.006-0.1% 수준으로 변화시킨 것이고 화학성분은 Table 1에 나타내었다. 모든 잉곳은 주조시에 발생하는 수축공 부위를 절단하여 제거시킨 후에 열간압연 공정에 투입하였다.

열간압연 조건은 1250℃에서 2시간동안 열처리로에서 균질화처리한 후에 일관 공정에 의해 열간압연하는 방식을 채택하여 수행하였다. 최종 열간압연 판재는 ~6mm의 두께로 제조되었다. 열간압연된 판재는 기계가공에 의해 표면의 산화막을 제거하고 최종 5.4mm로 연삭하여 가공되었다. 열간압연재는 770℃에서 8시간동안 유지한 후에 분당 30℃로 냉각하는 열처리공정을 통하여 연화처리한 후에 냉간압연을 수행하였다. 냉간압연은 3

종의 열간압연재를 일정길이로 절단하여 각 강재에 대해 10-90% (7종류)의 압축율로 각각 냉간압연하였다.

### 2.2 경도, 인장 및 열피로 시험

냉간압연재의 경도는 Semi-Vickers 경도기를 이용하여 각 시편마다 5-10회씩 실시하여 평균하여 측정되었다. 인장시편은 두께 2.0mm (또는 3.0mm), 게이지 길이 25mm의 판상형태로 가공되었다. 또한 본 연구에서는 용접비드 경계가 시편에 포함되지 않도록 용접비드에 평행하게 채취된 P 시편과 인장시험편의 중앙에 용접비드 경계가 포함되도록 가공한 V 시편을 구별하여 특성을 평가하였다. 인장 시험은 인장방향과 용접비드 계면이 수직하게 가공한 판상시편을 이용하여 분당 1mm의 속도로 상온, 300, 400, 500, 600℃에서 수행되었다. 인장특성은 각 시편마다 2회씩 실시하여 측정하여 평균하여 도출되었다. 모든 기계적 특성평가는 용접부 표면을 ~0.5mm 정도 연마한 후에 1층 육성용 접재만을 이용하여 측정되었다. 또한 인장시험편 중심에 용접비드가 존재하는 V 시편은 용접비드 경계의 존재에 따른 기계적 특성변화를 이해하기 위하여 수행하였다.

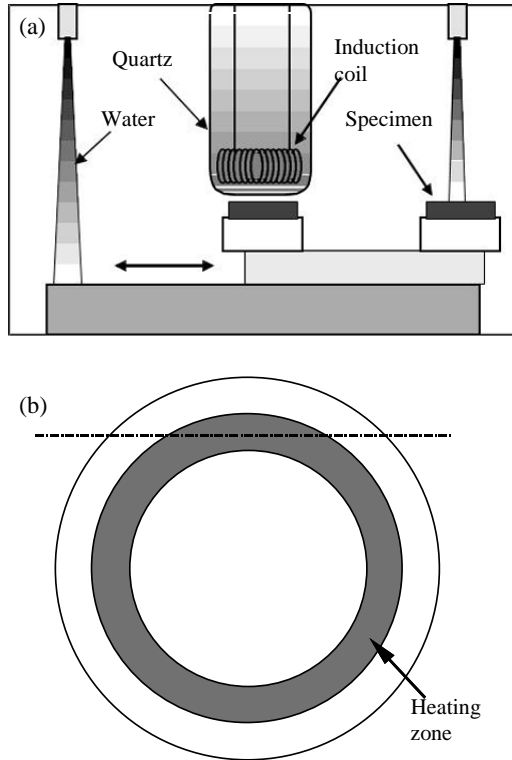
열피로 시험에 사용된 장치와 시험편의 개략적인 모식도는 Fig. 1에 나타내었다. 열피로 특성평가는 유도가열에 의해 시편의 일부분을 ~20초 동안 700℃로 승온시키고 ~20초동안 수냉하여 상온으로 냉각시키는 과정을 반복하여 시험하였다. 본 연구에서 열피로 시험은 Fig. 1(a)에 묘사된 장치를 이용하여 상온↔700℃의 열피로 사이클을 1000회 반복하여 수행하였다. 열피로 시편은 Ø70×25mm로 기계가공한 후에 #800의 emery paper로 연마하여 이용되었다. 열피로 균열깊이는 Fig. 1(b)에 나타난 선을 따라 유도가열부 중심을 따라 절단한 후에, 광학현미경을 이용하여 측정하였다. 그리고 평균 열피로 균열깊이는 적어도 100-200개의 균열을 샘플링하여 각각의 깊이를 측정하였으며 각각의 균열깊이에 대한 분포와 빈도를 도출하였다.

### 2.3 일렉트로슬래그 용접시험

일렉트로슬래그 용접기의 본체는 기존 SAW용 용접

**Table 1** The analyzed chemical compositions of 420-series STS ingots produced by VIM process

	C	Cr	Ni	Mo	W	Cu	Nb	V	Si	Mn	N
HCW1	0.140	12.1	1.8	0.95	0.47	0.39	0.28	0.29	0.42	0.72	0.006
HCW2	0.146	13.1	1.8	0.96	0.47	0.39	0.30	0.29	0.43	0.71	0.053
HCW3	0.145	12.4	2.1	0.96	0.70	0.38	0.30	0.30	0.42	0.68	0.100



**Fig. 1** Schematic diagrams of apparatus(a) and specimen(b) for the thermal cycling fatigue test used in this study

기에 사용되는 1000A의 발전기를 갖는 Lincoln Weld사의 NA-5 모델을 이용하였으며, 스트립을 이용한 일렉트로슬래그 용접에 의한 클래딩 작업에 적절하도록 자체적으로 개조하여 제작하였다.

인장 및 열피로 시편 제작에 사용된 스트립 전극재는 분말압연으로 만들어진 새로운 420계 스테인레스강 스트립재를 이용하였다. 실험에 사용된 모재는 연주 가이드롤에 사용되는 강종과 동일한 두께 ~35mm의 SCM440이며 합금성분은 Table 2에 나타내었다. 플럭스는 Soudo metal사의 제품으로 EST122 (6.96% SiO<sub>2</sub>, 24.85% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 64.92% CaF<sub>2</sub>, 0.02% MgO, 2.21% Na<sub>2</sub>O, Others)을 대상으로 조사하였으며 소결형 플럭스다.

본 연구에 적용된 용접법은 용접효율이 매우 높고 희석율이 매우 적은 일렉트로슬래그 용접법을 이용하였다. 용접시공은 bead-on-plate형태로 수행되었으며 용접비드를 single bead 형상으로 용접을 수행하였다. 본

**Table 2** The chemical compositions of SCM440 base metal and new 420-series stainless steel strip electrode (60mm) produced by powder rolling method (wt.%)

Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	Nb	Cu	Al	P	N	S
New 420-series STS	0.11	0.08	0.15	14.0	2.02	1.17	0.45	0.230	0.200	0.37	0.049	0.005	0.030	0.0028
SCM440	0.38	0.26	0.76	1.0	0.07	0.17	0.01	0.002	0.001	0.14	0.006	0.015	0.007	0.0013

**Table 3** Electroslag welding conditions used in weldability tests

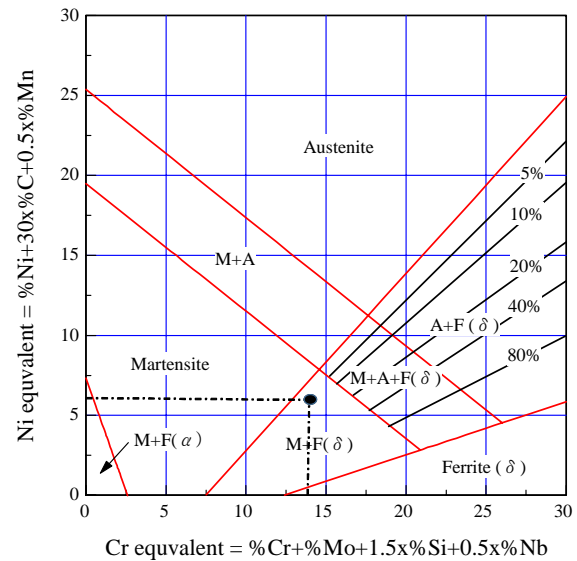
Item	Condition
Voltage	26V
Current	1,300A
Welding speed	17.78cm/min
Polarity	Negative
Electrode angle	Normal to surface
Preheating	None
Material	New 420-series STS strip of 60mm (width)

연구에서는 일렉트로슬래그 클래드 용착금속의 화학성분은 표면을 연마한 후에 발광분광분석기를 이용하여 용착금속의 합금원소 변화를 분석하였다. 용접성 평가를 위해 사용된 용접조건은 Table 3에 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 그물망 용접조직으로 미세조직 제어된 신합금

앞서 연구결과와 경험<sup>11-13)</sup>에서 420계 마르텐사이트 스테인리스강의 용접조직을 델타-페라이트가 그물망 상태로 제어하는 합금을 얻은 바가 있다. 이는 Fig. 2의 Schaeffler



**Fig. 2** A Schaeffler diagram based on Cr and Ni equivalents

diagram을 기준으로 약 5-10% 수준의 델타-페라이트가 예측되는 성분범위에서 얻을 수 있었다.

$$\text{Cr 당량} = (\text{Cr}) + (\% \text{Mo}) + 1.5 * (\% \text{Si}) + 0.5 * (\% \text{Nb}) \quad (1)$$

$$\text{Ni 당량} = (\% \text{Ni}) + 30 * (\% \text{C}) + 0.5 * (\% \text{Mn}) \quad (2)$$

본 연구에 사용된 새로운 420계 스테인레스강의 성분을 바탕으로 Schaeffler diagram의 Ni, Cr당량을 계산하면 각각 6.36과 13.82로 계산되었다. 이를 바탕으로 Schaeffler diagram내에 위치시키면 약 5% 수준의 델타-페라이트가 예측된다.

마르텐사이트 스테인레스강에서 델타-페라이트 함량이 많은 경우에는 그물망 조직으로 존재하지 않고 매우 조대하고 매우 들쭉날쭉한 계면의 델타-페라이트가 존재하는 것이 일반적이다<sup>14,15</sup>. 그러나 420계 스테인레스강은 델타-페라이트 양이 약 10%이하 수준에서는 그물망 조직을 형성함을 알 수 있었다. 이 합금의 상변화 단계는 Fig. 3의 약 0.14%C 조성표시를 참고하면  $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \delta + \gamma \rightarrow L + \gamma \rightarrow \gamma$ 의 순서로 추정된다<sup>16</sup>. 따라서 일렉트로슬래그 클래딩과 같이 다소 급격한 냉각과정을 거치는 합금은  $L + \delta \rightarrow L + \delta + \gamma$  상변태과정에서 미세한 델타-페라이트가 용접조직에서 그물망 조직으로 존재하는 것으로 추정된다.

### 3.2 새로운 420계 스테인레스강의 열간 및 냉간가공 특성

내열용 스테인레스강의 열간 그리고 냉간가공 특성의 이해는 향후 스트립 판재제조에 필요한 기초자료를 얻는데 그 목적이 있다. 스트립 가공에 필요한 여러가지 인자의 도출은 스트립 제조에 필요한 열처리온도, 압화율, 압화온도등과 같은 생산조건을 설정하는데 있어서

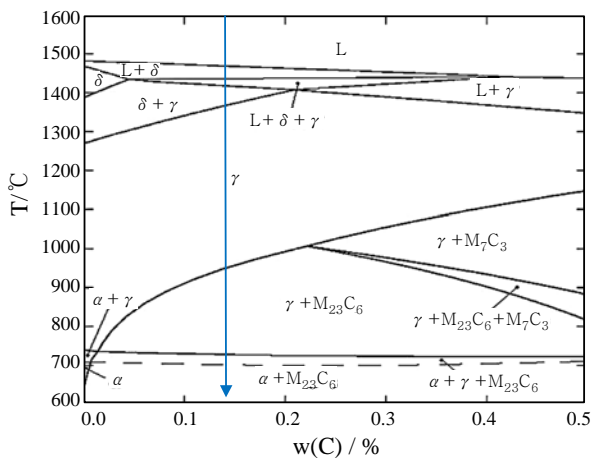


Fig. 3 Vertical section of phase diagram of Fe-C-12.5Cr-4.5Ni-0.5Si-0.6Mn calculated by Thermal-Calc<sup>16)</sup>

필수적이다.

열간압연조건은 POSCO가 보유한 pilot 규모의 열간 압연기에서 축적된 경험과 자료를 바탕으로 제안한 1250°C에서 2시간동안 대형 열처리로에서 균질화처리한 후에 반복 공정에 의해 열간 압연하는 방식을 채택하여 수행하였다. 최종 열간 압연 판재는 ~6mm의 두께로 제조되었다. 이 결과 얻어진 열간압연재는 고합금 강임에도 불구하고 매우 건전한 상태였고 예상외로 열간성형성이 매우 양호하다는 결과를 얻었다. 그래서 냉간성형성을 보다 정밀하게 연구하는데 집중하였다.

열간압연재는 냉간압연시 가공에 대한 부하를 최소화하기 위하여 770°C에서 8시간동안 유지한 후에 노냉하여 연화처리하였다. 냉간압연은 3종의 열간압연재를 일정길로 절단하여 각 강재에 대해 7종류의 압화율(10, 30, 50, 60, 70, 80, 90%)로 각각 냉간압연하였다. 냉간압연 판재의 외관은 매우 건전하며 90%의 압화율에서도 판재 edge에서 균열이나 가공결함이 관찰되지 않을 정도로 매우 우수한 가공성을 지닌 것으로 판단된다. Fig. 4는 냉간압연 판재의 외관을 보여주는 사진이다. 각각의 압화율에서 냉간압연된 판재는 매우 건전한 표면과 가공상태를 보여줌을 확인할 수 있다. 따라서 본 그물망 용접조직으로 합금설계된 420계 내열용 마르텐사이트 스테인레스강은 손쉽게 스트립재로 만들어 질 수 있다는 사실을 확인하였다.

### 3.3 그물망 용접조직을 갖는 새로운 420계 스테인레스강의 연화온도 결정

Fig. 5는 Table 1의 합금을 이용하여 여러가지 냉간

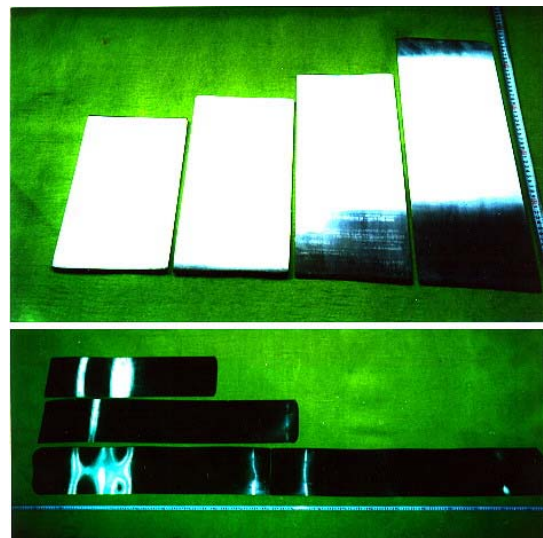
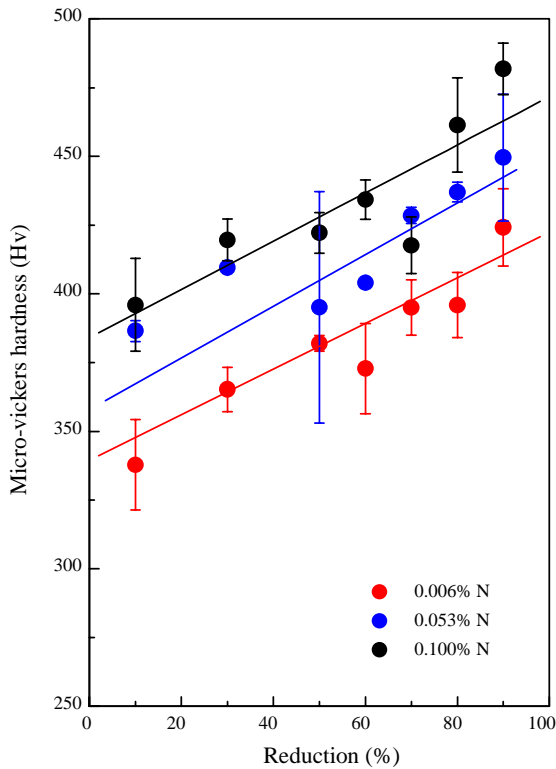


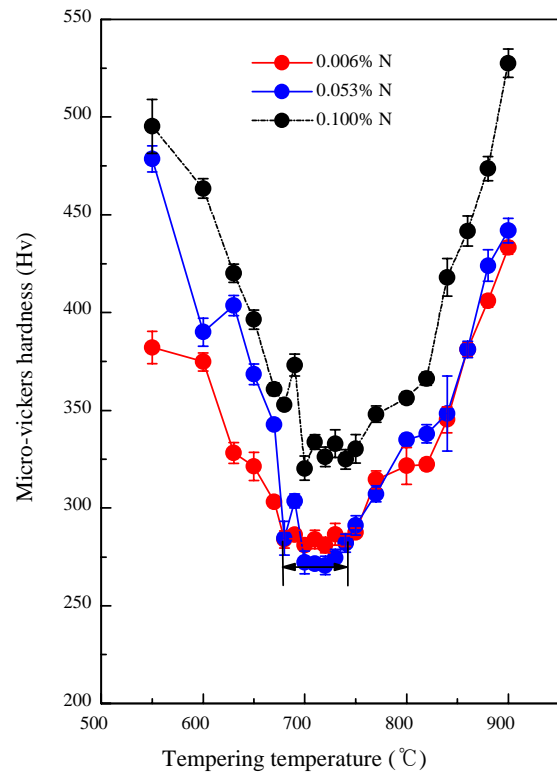
Fig. 4 Photographs showing the new 420-series stainless steel strips as a function of cold rolling reduction



**Fig. 5** Variations of micro-Vickers hardness as a function of cold rolling reduction in new 420-series stainless steels

압하량에 따른 경도변화를 측정된 결과이다. 냉간압연재의 비커스 경도는 냉간압하량이 증가함에 따라 크게 증가하며 HCW1은 337.8에서 424.2로 증가하며 HCW2는 386.5에서 449.6으로 HCW3은 396에서 481.8로 각각 증가한다. 각 합금에서 10%와 90%의 냉간압하량에 의한 경도차이는 86.4, 63.1, 85.8으로 측정되었다. 이와 같이 현재 합금은 열간압연 상태나 약간의 냉간압연 상태에서도 상당한 경도가 예상되므로 스트립의 원활한 feeding과 원하는 폭으로 스트립을 절단할 때에는 높은 경도가 문제로 대두될 수 있다.

그러므로 420계 합금의 연화온도를 측정하기 위하여 90%의 냉간압연된 판재를 10-20°C 간격으로 변화시키면서 550-900°C 온도범위에서 1시간동안 열처리하였다. 열처리된 냉간압연 판재는 일정크기로 절단되어 적어도 5회이상의 경도측정을 통하여 평균한 값을 사용하였다. 이와 같이 냉간압연 판재의 연화온도는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 합금에 따라 다소 차이가 있지만 680-750°C 범위인 것으로 측정되었다. 이 온도보다 낮은 영역에서 경도가 감소하는 원인은 냉간압연재의 회복과 미세 크롬산화물의 조대화등에 의한 것으로 판단된다. 그리고 이 온도보다 높은 영역에서의 경도증가의 주원인은 고온 노출시에 생성된 오스테나이트가 마르텐



**Fig. 6** Variation of micro-Vickers hardness as a function of tempering temperature in 90% cold reduced new 420-series stainless steels

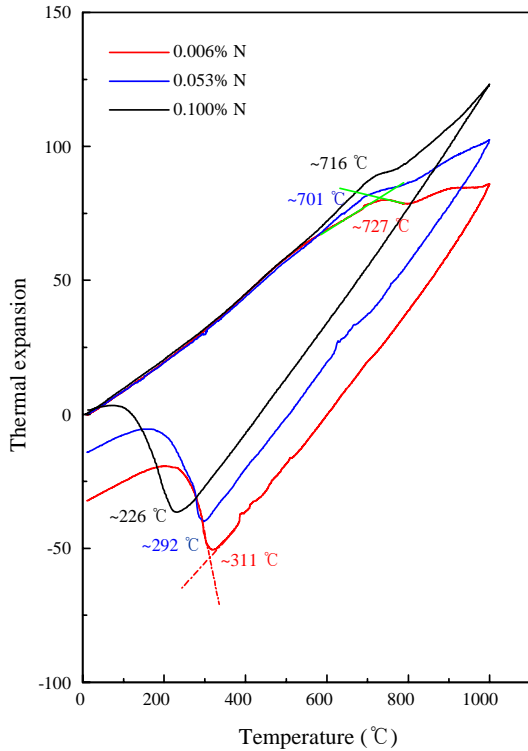
사이트로 역변태할 수 있는 온도이기 때문에 판단된다. 이 온도는 통상적으로 오스테나이트 생성시작온도보다 다소 높다.

이러한 추측은 냉간압연재를 dilatometer를 이용하여 측정된 시험에서 잘 나타난다. Fig. 7은 각각 HCW1, HCW2, HCW3 합금에 해당하는 온도-열팽창 곡선으로 Ac1온도가 727°C(HCW1), 701°C(HCW2), 716°C(HCW3)로 측정되었다. 이 온도는 육성용접재를 이용하여 측정된 Ac1온도가 ~760°C보다도 낮은 것으로 보아 심한 가공경화에 의한 상평형의 변화로 오스테나이트 생성시작온도가 낮아졌기 때문에 판단된다. 그러므로 앞서 이용된 연화처리온도인 770°C 보다는 본 합금에 적합한 680-730°C 온도범위로 수정되어야 한다.

반면에 마르텐사이트 변태개시온도는 HCW1의 경우 311°C이고 HCW2의 경우에는 292°C이며 HCW3의 경우에는 226°C이다. 이 결과는 N 함량의 증가에 따라 마르텐사이트 개시온도가 감소하는 것으로 일반적인 경향에 잘 일치하며 본 합금의 용착금속이 충분히 상온에서 마르텐사이트 변태가 완료됨을 의미한다.

### 3.4 새로운 420계 스트립재 용착금속의 인장특성

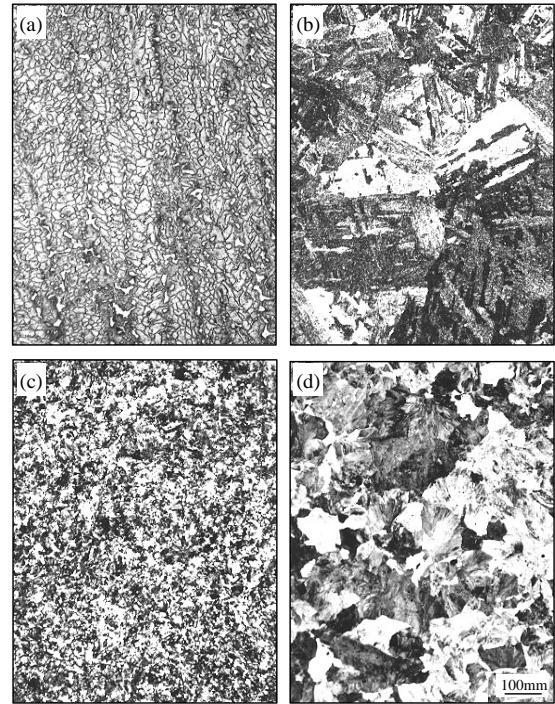
Fig. 8은 그물망 용접조직으로 합금설계된 420계 스



**Fig. 7** Variation of thermal expansion as a function of temperature in new 420-series stainless steels

테인레스강 스트립으로 클래딩된 단면 미세조직으로 확연히 다른 델타-페라이트 분포를 보인다. 420계 스테인레스강은 열피로 균열전파에 대한 저항성을 개선시키기 위하여 그물망 조직으로 설계되어 있으므로 육성층의 미세조직은 앞서 보고한 430 스테인레스강의 조직과는 매우 다르다<sup>4,15)</sup>. Fig. 8(a)는 420계 스테인레스강 스트립으로 클래딩된 전형적인 미세조직을 나타낸 것이다. 실제 열피로시험 결과에서 알 수 있지만, HCW420계 합금은 일반적인 마르텐사이트계 오버레이재가 열피로 균열이 특정방향으로 집중적으로 성장하여 연주 가이드롤은 갑작스러운 파단시키는 문제를 억제할 수 있거나 균일한 마모를 유도한다는 장점이 있다.

Fig. 9에서 P 시편의 상온 인장특성은 N이 ~0.1% 까지 상승하더라도 큰 강도증가는 보이지 않는다. 반면에 연신률은 소량 증가하는 경향을 보인다. 그리고 300°C에서 시험한 P 시편의 인장강도는 N함량에 따라 거의 차이가 없으며 연신률은 N함량이 증가함에 따라 소량 감소하는 경향을 보인다. 400°C에서 시험한 P시편의 인장강도는 0.05%에서 다소 증가하다가 0.1%N에서 상당량 감소하며 연신률은 소량 감소하는 경향을 보인다. 500°C에서 시험한 P 시편의 인장강도는 N 함량이 증가함에 따라 오히려 감소하며 연신률은 거의 일정하거나 다소 감소한다. 600°C에서 시험한 P시편의 인장강도는 N 함량이 증가함에 따라 크게 강화되는 경향을

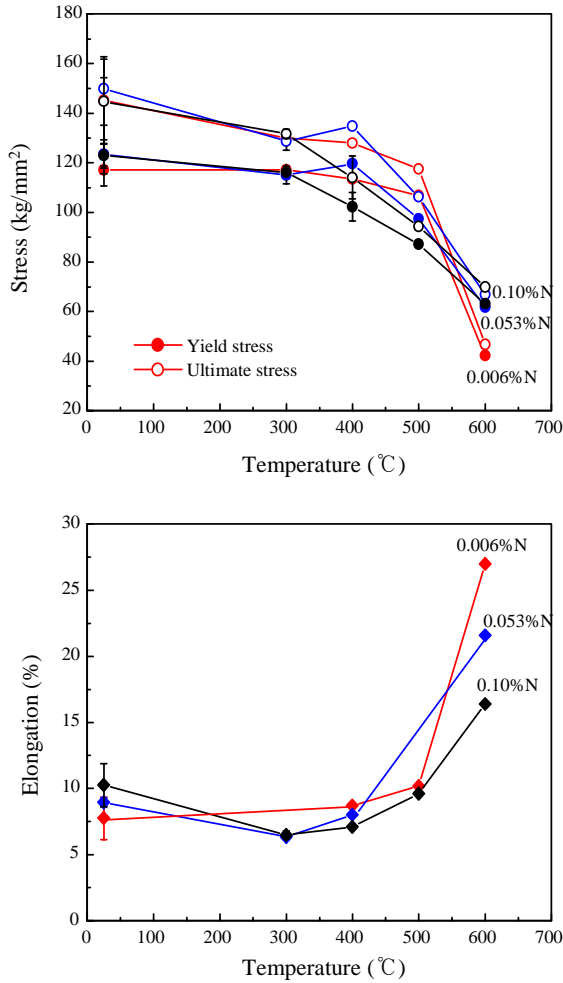


**Fig. 8** Optical micrographs showing the cross-sectional views of weld metals in electroslag cladding by using 420-series stainless steel strip. (a) Weld metal, (b) Heat affected zone near by the weld metal, (c) Heat affected zone near by the base metal, (d) Base metal

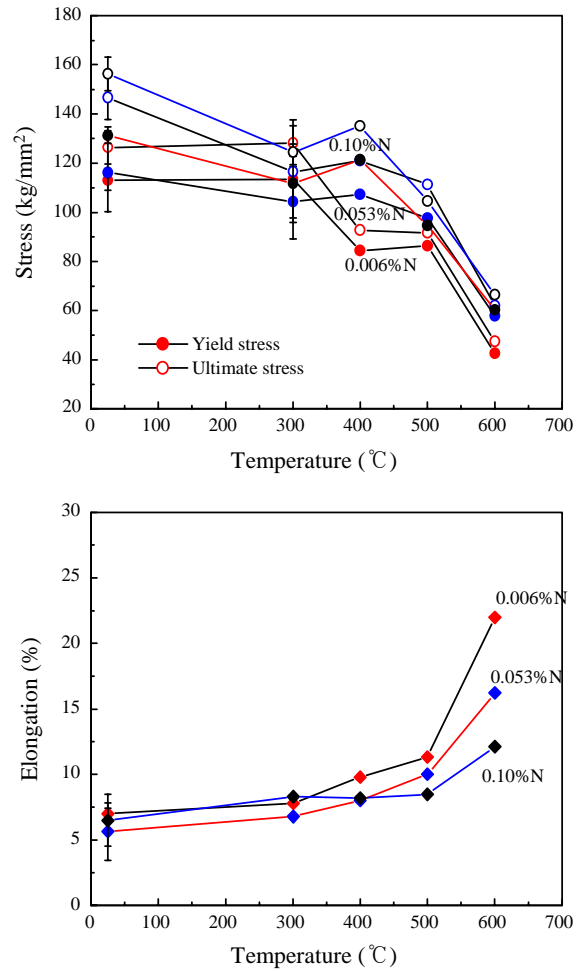
보이며 연신률은 크게 감소하는 결과를 보인다.

그리고 Fig. 10에서 V 시편의 인장강도는 N함량의 증가에 따라 상당량 증가하며 연신률은 거의 변하지 않았다. 반면에 V 시편의 300°C 인장강도는 N함량이 증가함에 따라 큰 증가를 보이며 연신률은 감소했다가 다시 증가하는 양상을 보인다. 그리고 V시편의 400°C 인장강도는 약 0.05%N에서 다소 강도가 감소하다가 0.1%N에서 다시 증가하며 연신률은 거의 변하지 않는다. 반면에 V시편의 500°C 인장강도는 다소 증가했다가 거의 일정해지는 경향을 보이며 연신률은 소량 감소하는 양상을 보인다. V 시편의 600°C 인장강도와 연신률 거동도 P시편과 거의 유사한 경향을 보인다.

주어진 N 함량에서 시험온도에 따른 인장특성의 변화를 요약하면 다음과 같다. 420계 스테인레스강의 N 함량이 극단적으로 낮은 경우에는 300°C까지는 강도가 다소 감소하다가 500°C까지는 완만하게 감소하며 600°C에서 강도의 큰 감소를 보인다. 그리고 0.05-0.1%N 함량의 시편은 300°C까지는 강도가 감소하는 경향은 같지만 400°C에서 오히려 강도가 다소 증가하는 현상을 보인다. 이 때 연신률도 강도가 증가함에도 불구하고 오히려 소량 증가하는 양상을 보인다. 특히 N이 가장 낮은 시편의 600°C/RT의 항복강도비는 0.36-0.38



**Fig. 9** Variations of tensile properties as a function of test temperature in electroslag clad new 420-series stainless steels (P type specimens, 0.006-0.10%N)



**Fig. 10** Variations of tensile properties as a function of test temperature in electroslag clad new 420-series stainless steels (V type specimens, 0.006-0.10%N)

로 크게 감소하는 반면에 N함량이 가장 높은 시편의 경우에는 0.46-0.51로 내열특성이 크게 향상된다. 그러므로 작은 질소함량 차이에도 불구하고 고온연성은 크게 영향을 받지만 내열강도는 상당히 개선가능하다.

용착금속간 용접비드는 불안정한 조직의 하나로 인식되고 있으며, 실제로 상온 연신률을 비교하면 P 시편(7.5-10.5%)이 V 시편(6-7%)에 대비하여 높다. 결국 용접비드가 일종의 결함을 내포하는 자리라는 것을 간접적으로 보여준다. 반면에 항복 및 인장 강도에 있어서는 그렇게 큰 차이를 보이지 않고 두가지 시편 모두 약 115-160kg/mm<sup>2</sup> 범위에 놓인다. 결국 P, V 시편은 용접비드라는 결함이 상온 및 고온 연신률에 더 큰 영향을 주는 것으로 측정되었다.

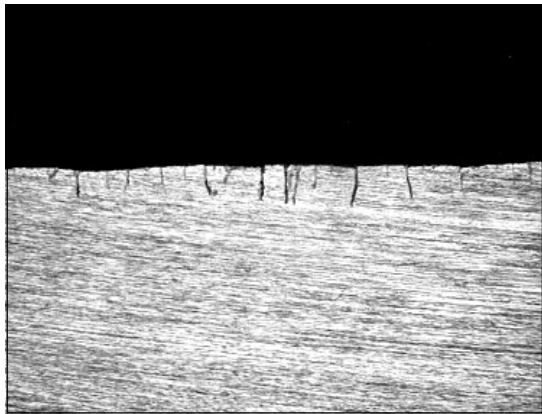
### 3.5 열피로 특성

새로운 420계 스테인레스강 스트립으로 일렉트로슬

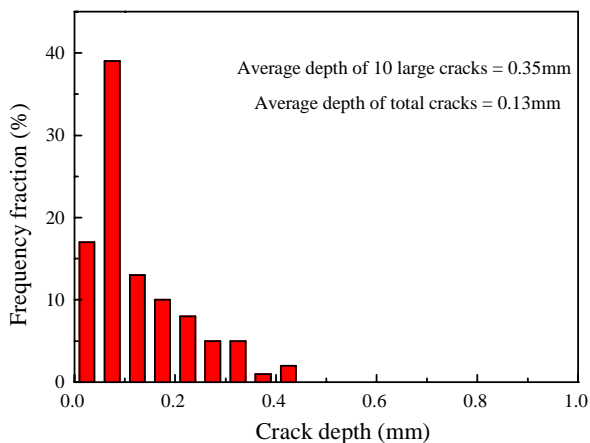
래그 오버레이 용접된 시편을 이용하여 상온에서 700°C 까지 급가열하였다가 수냉에 의해 급냉시키는 열피로시험을 1,000회 수행한 후에 열피로 균열의 깊이를 측정하였다.

Fig. 11은 가열부위의 중앙을 정확하게 절단하여 얻어진 열피로 시편의 단면을 관찰한 사진으로 많은 균열들이 균일하게 존재함을 보여준다. 균열들은 대부분 균일하게 성장하여 특정한 균열들이 우선적으로 성장하는 문제는 발생하지 않는다. 이 결과는 본 합금이 열피로 균열의 성장에 있어서 우선적으로 진행되는 것을 막아주는 효과가 있음을 단적으로 보여주는 예이다. 실제로 연주 가이드를 현장적용 시험(SAW용 오버레이 용접재)에서는 타 재질이 특정한 방향으로 균열전파가 진행되는 반면에 본 합금의 경우에는 미세균열이 각 그물망 조직의 경계를 따라 분산됨을 관찰할 수 있었다.

Fig. 12는 여러 개의 시편에서 얻어진 열피로 균열



**Fig. 11** Stereo-optical micrograph showing the cross-sectional view of weld metal after thermal cycling test (1,000 cycles at RT⇌700°C) in an electroslag clad new 420-series stainless steel



**Fig. 12** A diagram showing the frequency of crack depth length in the cross-sectional area of weld metal after thermal cycling test (1,000 cycles at RT⇌700°C) in an electroslag clad new 420-series stainless steel (average depth of large 10 cracks = 0.35mm, average depth of total cracks = 0.13mm)

깊이의 크기분포를 도식화한 것으로 평균 균열크기도 0.13mm로 작을 뿐만 아니라 가장 큰 10개의 균열깊이를 평균한 크기도 0.35mm로 매우 작아서 열피로 균열성장 에 대한 저항성이 우수함을 알 수 있다. 이 결과는 잠호용접법으로 클래딩한 열피로시험편의 평균 균열 크기 0.142mm와 가장 큰 10개의 균열깊이를 평균한 크기인 0.391mm보다 우수하다<sup>13)</sup>. 일렉트로슬래그 육성용접재의 열피로 균열크기는 잠호용접된 동일 재질에 비해서도 거의 동등하거나 상대적으로 우수한 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 새로운 420계 스테인리스강 스트립의 질

소함량과 냉간압하량의 함수로 기계적 특성 변화를 조사하였다. 또한 주어진 용접조건에서 일렉트로슬래그 클래딩한 시편을 이용하여 인장 및 열피로 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 잔류 delta 페라이트가 그물망 형태로 존재하는 용접 조직은 Cr당량과 Ni당량을 기준으로 만들어진 Schaeffler diagram에서 약 5%의 델타 페라이트가 존재하는 조성범위에서 얻어진다.

2) 그물망 용접조직으로 합금설계된 420계 스테인리스강의 연화온도는 10-90%로 냉간압연된 판재를 이용하여 조사한 결과, 680-730°C로 결정되었다.

3) 용착금속의 600°C/RT 항복강도비는 N이 가장 낮은 시편에서 0.36-0.38인 반면에 N함량이 가장 높은 시편의 경우에는 0.46-0.51로 내열특성이 크게 향상된다. 그러나 고온연성은 질소함량이 증가함에 따라 열화되었다.

4) 용착금속간 용접비드의 존재는 항복 및 인장강도 보다는 상온 및 고온 연신률을 저하시켰다.

5) 일렉트로슬래그 클래딩된 시편의 열피로 특성은 기존 동등재질을 submerged welding method로 제조한 시편의 열피로 특성과 비교하면 거의 동등하거나 보다 우수한 특성을 보였다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 과제지원으로 이루어졌으며, 이에 감사를 드립니다.

ORCID: Jae-Young Jung : <http://orcid.org/0000-0001-8570-3845>

#### References

1. S.G.Forsberg, Resistance Electroslag (RES) Surfacing, *Welding J.*, 64(8) (1985), 41-48
2. Y.K.Oh, J.H.Devletian, and S.J.Chen, Low Dilution Electroslag Cladding for Shipbuilding, *Welding J.*, 69(8) (1990), 37-44
3. Thakare Niraj S, Ram Yadav, Electro Slag Strip Cladding Process, *Int'l J. of Modern Engineering Research*, 4 (2014), 60-64
4. B.E.Paton, D.A.Dudko, K.A.Yushchenko, I.I.Lychko, and I.I.Sushchuk-Slyusarenko, Electroslag welding: A status report, *Welding J.*, 76(12), (1997) 51-58
5. John Joseph Barger, Apparatus and method for submerged arc strip cladding of metallic work pieces, US Pat. No. 4027135A, (1975)
6. Susan Pak, Solveig Rigdal, Leif Karlsson and Ann-Charlotte Gustavsson, Electroslag and submerged arc stainless steel strip cladding, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 45(1) (1998), 41-47  
<https://doi.org/10.1108/00035599810368012>



7. M. F. Gittos, Disbonding of Austenitic Stainless Steel Cladding Following High Temperature Hydrogen Service, *Welding in the World*, 52(3-4) (2008), 54-67  
<https://doi.org/10.1007/BF03266632>
8. N. Venkateswara Rao, G. Madhusudhan Reddy, and S. Nagarjuna, Weld overlay cladding of high strength low alloy steel with austenitic stainless steel - Structure and properties, *Materials and Design*, 32 (2011), 2496-2506  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.026>
9. V. V. Satya Prasad, and G. Madhusudhan Reddy, Microstructure and Mechanical Properties of Electroslag Strip and Explosively Clad Low Alloy Steel: Stainless Steel Joints, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 65(2) (2012), 135-143  
<https://doi.org/10.1007/s12666-012-0124-y>
10. L. Karlsson, Welding duplex stainless steels - A review of current recommendations, *Welding in the World*, 56 (2012), 65-76, <https://doi.org/10.1007/BF03321351>
11. Jae Young Jung, Eung Ryul Baek, Sang Ho Ahn, Seong Hun Choo, Sung Hak Lee, and Nack Joon Kim, Effects of C and Cr on the As-Welded Structures and Mechanical Properties of Fe-(12-17)%Cr-(0.19-0.32)%C Hardfacing Stainless Steels, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, 34(10) (1996), 1321-1332
12. Jae Young Jung, Eung Ryul Baek, and Sang Ho Ahn, Microstructural Change of Hardfacing Fe-Cr-Ni-C Stainless Steels during Thermal Cycling Fatigue, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, 36(3) (1998), 320-328
13. Jae Young Jung, Hwan Jin Sung, and Sang Ho Ahn, Thermal Cycling Fatigue Behavior of Hardfacing Heat-Resistant Stainless Steel for Continuous Caster Rolls, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, 36(1) (1998), 33-43
14. Jae Young Jung and Tae Kwon Ha, Effects of Welding Parameters on the Overlay Welding Behaviors in Electroslag Cladding by using AISI 430 Stainless Steel Strip - Experimental Study, *Journal of Welding and Joining*, 35(5) (2017), 77-86  
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.5.11>
15. Jae Young Jung and Tae Kwon Ha, The Changes of Chemical composition and Microstructure in Electroslag Cladding Overlays by using AISI 430 Stainless Steel Strip, *Journal of Welding and Joining*, 35(5) (2017), 48-56, <https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.5.7>
16. P. Wang, S.P. Lu, N.M. Xiao, D.Z. Li, Y.Y. Li, Effect of delta ferrite on impact properties of low carbon 13Cr-4Ni martensitic stainless steel, *Materials Science and Engineering A*, 527 (2010), 3210-3216  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.01.085>