

# 니켈 기반 초합금 클래드 판재의 열간 압연 제조 공정 유한요소해석

김찬양<sup>1</sup> · 배성준<sup>2</sup> · 이현석<sup>3</sup> · 봉혁중<sup>4</sup> · 이광석<sup>5, #</sup>

## Finite Element Analysis of the Hot Rolled Cladding for the Ni-based Superalloy/steel Corrosion-resistant Alloy (CRA) Plate

C. Kim, S.J. Bae, H. Lee, H.J. Bong, and K.S. Lee

(Received May 14, 2024 / Revised May 28, 2024 / Accepted May 28, 2024)

### Abstract

Ni-based superalloys have exceptional performance in high-temperature strength, corrosion resistance, etc, and it has been widely used in various applications that require corrosion resistance at high-temperature operations. However, the relatively expensive cost of the Ni-based superalloys is one of the major hurdles. The corrosion-resisted alloy(CRA) clad materials can be a cost-effective solution. In this study, finite element analysis of the hot rolling process for manufacturing of the Alloy 625/API X65 steel CRA clad plates is conducted. The stress-strain curves of the two materials are measured in compressive tests for various temperature and strain rate conditions, using the Gleeble tester. Then, strain hardening behavior is modeled following the modified Johnson-Cook model. Finite element analysis of the hot rolled cladding process is performed using this strain rate and temperature dependent hardening model. Finally, the thickness ratio of the CRA and base material is predicted and compared with experimental values.

**Keywords** : CRA clad metal plate, Hot rolling, Finite element method, Alloy 625, Johnson-Cook hardening law

## 1. 서론

니켈 기반 초합금은 우수한 고온 강도 및 고내부식성 등으로 인해 고온 및 부식 환경에서 동작하는 부품의 소재로 널리 사용된다[1]. 이러한 니켈 기반 초합금의 우수한 물성에도 불구하고, 이 소재의 높은 가격은 부품 소재로의 적용에 어려운 점이 있다. 금속 클래드 소재는 이러한 단점을 극복 할 수 있는 소재로, 서로 다른 특성을 지닌 금속 소재를 2개 층 이상 맞붙인 재료를 통칭한다[2]. 이러한 클래드 소재는 상이한 금속의 특성을 상호보완적으로 활용

할 수 있는 장점이 있다. 특히 니켈 기반 초합금/강판 클래드 등 내부식 합금 클래드 소재는 초합금의 우수한 물성과 상대적으로 저렴한 철강소재의 장점을 동시에 만족할 수 있는 대안이다. 이러한 클래드 소재는 압연, 압출, 브레이징 등 다양한 방법으로 제조 가능하다[3, 4]. 이 중 압연 클래드 공정의 경우 일반적으로 클래드 제조를 위한 단위소재를 맞대어 사면의 가장자리를 용접한다. 이렇게 제조된 압연용팩을 압연하여 클래딩이 진행된다. 이때 열간압연 시 압연 압력 및 온도로 인한 소재 사이의 확산이 일어나게 되며, 이를 통해 계면부 접합이 진행되어 클래딩 소재가 접합된다.

이러한 압연 클래딩 소재의 상업화를 위해서는 계면접합력 확보[2, 5-7], 클래딩 소재의 강도 확보[8] 등 다양한 소재 물성 측면의 성능 확보와 함께, 최초 모소재 두께비로부터 열간압연 클래딩 이후 단

1. 한국재료연구원 재료공정연구본부, 선임연구원  
2. 한국재료연구원 재료데이터·분석연구본부, 기술지원  
3. 포항산업과학연구원, 수석연구원  
4. 한국재료연구원 재료공정연구본부, 선임연구원  
5. 한국재료연구원 재료공정연구본부, 책임연구원  
#Corresponding Author: Korea Institute of Materials Science,  
E-mail: ksl1784@kims.re.kr, ORCID: 0000-0002-4378-7902

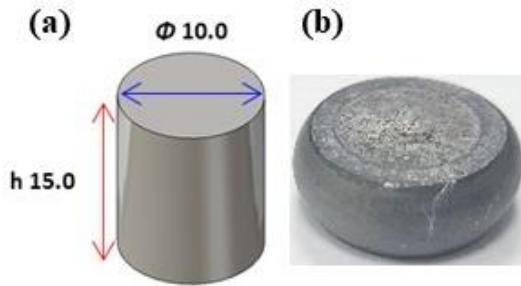


Fig. 1 (a) Specimen geometries in the compression tests; (b) Specimen shape after the tests

위소재 두께비를 예측하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 이를 위하여 API X65 철강 모재와 니켈 기반 초합금인 Alloy 625 소재의 열연 클래딩 공정을 유한요소해석으로 모사하였다. 열연 공정 해석에 필요한 응력-변형을 관계는 Alloy 625 및 API X65 각 소재에 대해 여러 온도 및 변형률 속도 조건에 대하여 글리블 장비(Gleeble tester)를 활용한 압축실험을 진행하여 실험 정보를 획득하였다. 그런 뒤, 획득된 압축 응력-변형률 선도를 기반으로 modified Johnson-Cook (J-C) 구성방정식의 재료 상수를 최적화하여 유한요소해석에 적용하였다[9]. 유한요소해석은 실제 Alloy 625/X65 소재의 열간 압연 클래드 실험과 동일한 조건으로 수행하였으며, 유한요소해석을 통해 예측된 소재간 두께비와 실험값을 비교하였다.

## 2. 실험조건

### 2.1 고온압축실험

열간 압연 클래드 공정의 정확한 전산모사를 위해서는 압연 공정 조건에 해당하는 온도 및 변형률 속도에서의 구성방정식과 그 상수가 필요하다. 본 연구에서는 이를 획득하기 위해 열간동적재료물성 시험기인 글리블 시험기 (Gleeble tester)를 활용하여 다양한 온도 및 변형률 속도 조건에서 압축 실험을 진행하였다. 변형률은 글리블 시험기에 장착된 LVDT 게이지로 압축시그 사이 변위를 측정하여 계산하였다. 압축 물성 평가는 모재인 API X65 철강과 내부식 소재인 Alloy 625 소재 모두 진행하였다.

Fig. 1은 압축실험 시 활용된 시편 형상과 압축실험 후 시편 형상 예시를 보여준다. 압축실험에는 직경 10 mm, 높이 15 mm의 원통형 시편이 활용되었으

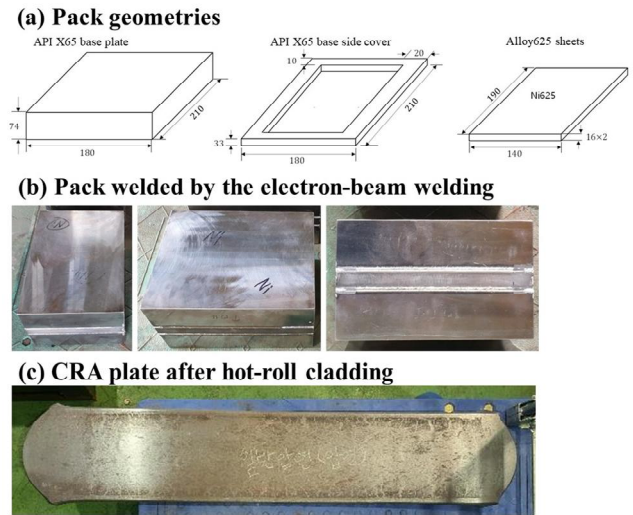


Fig. 2 Hot roll cladding conditions: (a) Rolling pack geometries; (b) The pack welded by the electron-beam welding; (c) CRA plate after hot roll cladding

며, 실험 후 Fig. 1(b)에서 확인할 수 있듯 약간의 배부름 (barreling) 현상이 발생하였다. 배부름 불안정성이 발생한 이후에는 압축시편에 인가된 국부 응력 상태가 단축 압축이 아닌 다축 응력이 인가되나, 압축 방향 응력의 크기 대비 타 방향의 응력은 비교적 작으므로 단순화를 위하여 이와 같은 효과는 무시하였다. 각 소재 별 압축실험에서 온도 및 변형률 속도 조건은 다음과 같다. X65 철강 소재는 섭씨 800도 부터 50도 간격으로 1250도 까지, Alloy 625 소재는 섭씨 900도부터 1250도 까지 50도 간격으로 압축 실험을 수행하였다. 압축실험 속도는 X65 철강에 대해 0.1, 1, 3, 10, 20/s 변형률속도로 압축실험을 수행하였으며, Alloy 625 소재는 0.1, 1, 3, 10, 30/s 속도로 수행하였다.

글리블 압축 실험을 통해 얻은 각 소재의 여러 온도, 변형률 속도 조건 별 응력-변형률 선도를 기반으로 modified Johnson-Cook 경화식의 재료상수를 최적화하였으며, 이는 3.1 절에 기술하였다.

### 2.2 열간압연 클래드 공정

본 연구에 활용된 열간압연 클래드 공정은 다음과 같다. 우선, Fig. 2(a)에 도시된 압연 팩을 API X65 모재와 Alloy 625 내부식 소재로 제조하였다. 모재와 내부식소재의 두께는 각각 74, 16 mm 로, 모재를 바깥쪽으로 하여 한 번의 압연에 두개 CRA 클래드

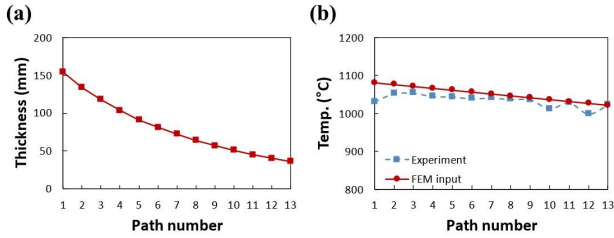


Fig. 3 (a) Thickness of the hot-rolled plate for each rolling path; (b) Temperature on the surface of the plate

판재가 만들어지도록 하였다. 이는 모재와 내부식 소재의 강도 차이로 인해 압연 중 휘는 것을 방지하기 위함이다. 또한 중심부 Alloy 625 소재의 사면을 감싸는 직사각형의 사이드 커버를 제작, 모재-사이드커버-모재 순으로 쌓고 사각 사이드커버 안에 내부식소재 두 장을 위치시켰다. 압연 클래딩 공정 후 두 장의 CRA 클래드가 잘 떨어질 수 있도록 중심부 두 장의 Alloy 625 소재 사이에는  $Al_2O_3$  이형재를 도포하였다. 이와 같은 구성의 압연팩을 Fig. 2(b)와 같이 전자빔 용접으로 접합하였으며, 접합 시 팩 내부 진공은  $5 \times 10^{-4}$  Torr 였다. 제작된 압연팩의 크기는  $180 \times 210 \times 181$  mm (폭×길이×두께) 였다.

열간압연 조건은 다음과 같다. 압연은 총 13단계에 걸쳐 실시하였으며, 압연 후 최종 두께는 36.2로 압하율은 80%였다. 각 압연 단계에서 이전 단계 대비 10-15% 내외 압하율로 열연을 수행하였으며, 각 압연단계 별 두께는 Fig. 3(a)에 도시하였다.

압연 속도는 첫번째와 마지막 열세번째 압연 단계에서 1183 mm/s, 나머지 두번째부터 열두번째 압연 단계에서는 1167 mm/s 였다. 열간압연 시 압연 팩은 초기 섭씨 1100도로 가열하여 압연을 실시하였으며, 압연 도중 표면 온도를 파이로미터로 측정하였다. 최종 압연 단계에서 압연판 표면의 온도가 섭씨 1000도 내외까지 감소하였다. 각 압연단계에서 측정된 온도는 Fig. 3(b)에 도시하였다.

위에서 기술한 압연두께, 압연속도, 표면 온도는 유한요소해석의 경계조건으로 활용하였다. 특히 표면 온도의 경우, 해석 조건의 단순화를 위해 첫번째 압연 단계에서 섭씨 1080도로 시작하여 최종 압연 단계에서 1020도까지 각 단계별 20도씩 선형 감소하는 것으로 근사하였다. 압연 후 실제 제조된 CRA 클래드 판은 Fig. 2(c)와 같았다.

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 구성방정식

열간압연 공정의 유한요소해석을 위해서는 공정 조건에 해당하는 온도 및 변형율속도 영역에 대한 구성방정식이 필수이다. 특히 고온, 동적 조건에서 경화거동 모델이 중요하다. 본 연구에서는 2.1절에서 서술한 바와 같이, 글리블 압축 실험 결과를 기반으로 고온, 동적 조건의 경화식을 최적화하였다. 고온 동적 조건 경화식 중 가장 널리 사용되는 것은 Johnson-Cook (JC) 모델이다.

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\epsilon}^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{ref}} \right) \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{ref}}{T_m - T_{ref}} \right)^m \right] \quad (1)$$

위 식에서  $\bar{\sigma}$  와  $\bar{\epsilon}$  는 등가응력과 등가변형율이며,  $\dot{\epsilon}$  는 변형율속도,  $T$  는 절대온도이다.  $\dot{\epsilon}_{ref}$  와  $T_{ref}$  는 각각 기준 변형율속도와 온도이며,  $T_m$  은 소재의 녹는점 절대온도이다.  $A, B, C, n, m$  은 재료상수로, 보통 우선 기준온도/변형율속도 조건에서 응력-변형율 관계를 최적화하여  $A, B, n$  를 구한 뒤, 다른 온도 및 변형율속도 실험 데이터와의 상대적 강도 차이를 이용해  $C$  와  $m$  을 구하게 된다.

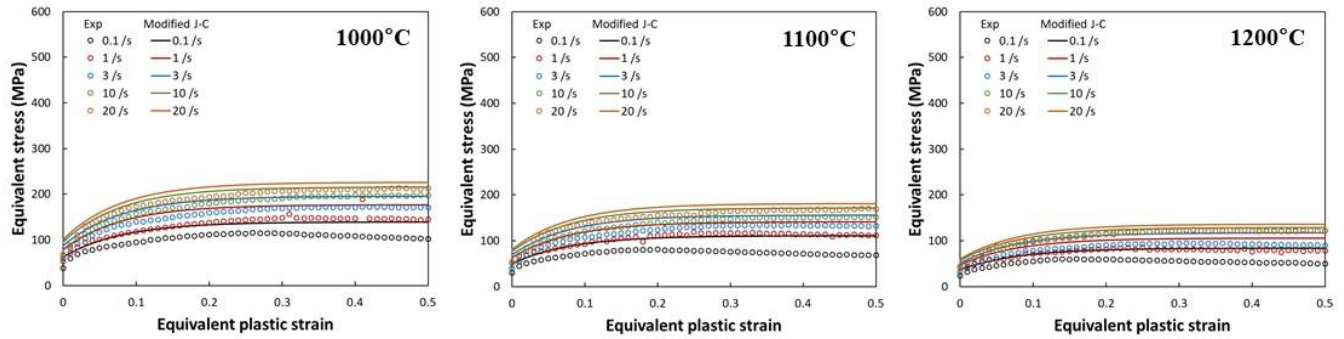
기본 JC 모델은 단순한 수식에도 불구하고 온도와 변형율 속도에 따른 금속 강도 및 경화거동 차이를 비교적 잘 모사한다[10]. 그러나 응력과 변형율 관계식이 power law 형태로 큰 변형율에서 지속적으로 항복강도가 증가하여, 철강 등의 소재가 고온 영역에서 응력선도가 수렴하는 것을 모사하기 어렵다. 따라서 본 연구에서 모사한 열간압연 공정은 섭씨 1000도 내외의 높은 온도에서 수행되었음을 고려하여, 응력-변형율 관계를 모사하는 power law 부분을 수렴하는 함수 꼴을 갖는 Voce law로 교체한 modified JC 모델을 활용하였다.

$$\bar{\sigma} = \left[ \sigma_0 + R(1 - \exp(-B\bar{\epsilon})) \right] \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{ref}} \right) \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{ref}}{T_m - T_{ref}} \right)^m \right] \quad (2)$$

이때,  $\sigma_0, R, B$  는 재료상수이다.

본 연구에서 modified JC 모델의 재료상수는 다음과 같이 최적화 하였다. API X65와 Alloy 625의 녹는

(a) API x65



(b) Alloy625

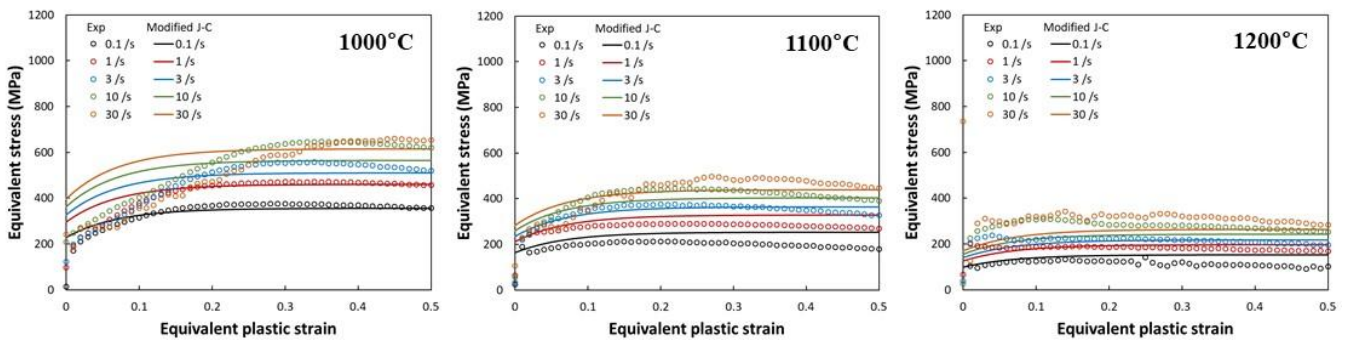


Fig. 4 Equivalent stress-strain curves of the modified Johnson-Cook (JC) hardening law: (a) API X65 steels; (b) Alloy 625

Table 1 Modified Johnson-Cook model parameters

	$\sigma_0$	R	B	C	m
API X65	86.5	108.9	12.6	0.1178	0.8089
Alloy 625	293.6	164.3	14.27	0.1276	0.9560

점온도 ( $T_m$ )는 각각 1174K, 1623K을 사용하였다. API X65와 Alloy 625 기준 온도는 각각 1073, 1173K로 선택했으며, 기준 변형율속도는 0.1/s 였다. 기준 변형율속도 및 온도에서 피팅으로 우선 Voce law의  $\sigma_0$ , R, B를 구한 뒤, 나머지 실험 정보를 통해 기준 상태 대비 온도 및 변형율 속도에 따른 소재 경화 거동을 모사하는 재료상수 C와 m을 도출하였다. Table 1 에는 전술한 피팅 과정으로 얻어진 modified JC 모델의 재료상수를 표기하였으며, Fig. 4에는 modified JC 모델과 글리블 압축 실험 결과를 섭씨 1000, 1100, 1200도 조건에 대해 대표로 비교 도시하였다. 피팅 결과, 실험값과 modified JC 모델 사이의 평균 제곱근 편차(root mean square error, RMSE)는 API X65와 Alloy 625가 각각 23 및 41 MPa 였다.

### 3.2 평면변형조건 유한요소해석 모델

유한요소해석에는 Abaqus/explicit을 활용하였으며, modified JC 모델은 사용자함수인 VUHARD를 활용하여 유한요소해석에 적용하였다. Fig. 5는 본 연구에 사용된 열연 클래드 제조 공정 유한요소해석 모델을 보여준다. 진공용접 된 실제 압연 팩은 CRA 소재와 철강 모재 경계면이 접합되지 않았으나, 해석의 용이성을 위해 완벽하게 접합된 경계면을 가정하고, 서로 위치에 따라 서로 다른 물성을 갖는 한 덩어리의 파트로 모델링하였다. CRA 소재가 철강 모재보다 강도가 훨씬 커 CRA소재와 모재 경계면에서 불균일한 변형으로 요소 형상의 왜곡(distortion)이 발생 가능하고, 이로 인한 해석 중단을 방지하기 위해 모재와 CRA 소재 경계면에서는 0.5

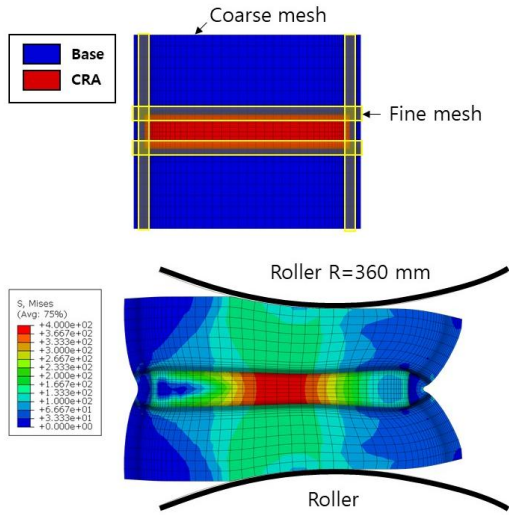


Fig. 5 Finite element model of hot rolling process

mm 크기의 작은 요소를, 압연 롤러 접촉부에는 큰 최종 압하율을 고려하여 두께방향으로 10 mm의 큰 요소를 사용하였다. 압연재료와 롤러 사이에 마찰은 Abaqus의 general contact 조건을 사용하되, 마찰 계수는 0.5를 적용하였다. 압연 속도나 압연 중 온도 이력 등 나머지 경계조건은 2.2절에 언급된 실험 조건과 동일하게 인가하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 6은 열간 클래드 압연 공정 유한요소해석 결과를 보여준다. Fig. 6(a)에서 확인할 수 있듯, 선단부를 둥글게 가공하지 않은 직사각형의 압연팩 형상과 중심부의 강한 Alloy 625 소재 물성으로 인해 피

쉬테일 현상이 발생한 것을 확인할 수 있다. 이러한 형상적 특성은 압연 후 CRA 소재의 모재 대비 두께비가 중심부와 선단부에서 달라지게 하였다. Fig. 6(b)는 압연 단계별 CRA/모재 소재 두께비 추이를 보여준다. 이 그래프에서 압연관 중심부의 두께비는 초기 소재 두께비와 유사하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이는 판재 중심부에서는 이상적인 평면 변형모드에 가까운 변형이 인가되어 철강 모재와 Alloy625 CRA 소재가 거의 동일한 변형을 겪었기 때문으로 생각할 수 있다. 반면, 피시테일 현상으로 인해 선단부에서는 인가된 변형 모드가 평면변형이 아니며, 철강 모재가 CRA 소재보다 훨씬 큰 변형을 겪어 CRA/모재 두께비가 압연 단계에 따라 지속적으로 증가하게 된다. 또한 Fig. 6(b)에서 실제 CRA 클래드 두께비 실험 측정값과 해석값이 유사함을 확인할 수 있어, 본 연구에서 제시한 modified JC 경화식과 압연 해석 모델의 정합성을 보여준다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 내부식 소재 니켈계 초합금 Alloy 625와 API X65 철강의 클래드 판재 열간압연 제조 공정을 유한요소해석으로 모사하였다. 고온 및 여러 변형률 속도에서의 소재 물성을 측정하기 위해 글리블 (gleeble) 압축 실험을 수행하였으며, 압축 실험 결과를 바탕으로 정량화 한 modified Johnson-Cook 경화식을 구성방정식으로 사용하였다. 또한 실제 열간압연 클래딩 실험을 수행하여, 실험 조건과 같은 경계조건으로 유한요소해석을 수행하였다. 본 연구

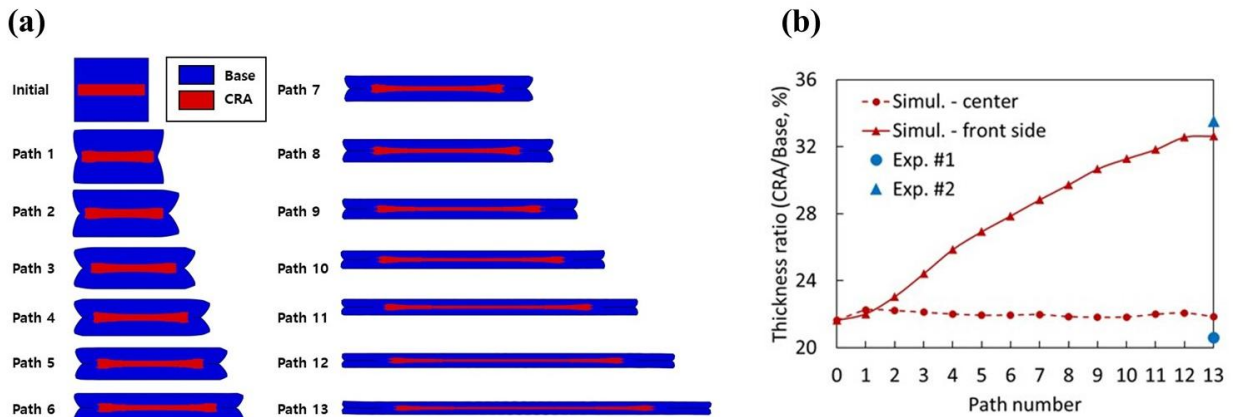


Fig. 6 Result of finite element analysis: (a) Hot-rolled plate geometries after each rolling path; (b) thickness ratio between Alloy 625 CRA / API X65 base materials

의 주요 결론은 아래와 같다.

(1) Alloy 625와 철강 모재의 클래드 제조 후 두께비에 대해 유한요소해석 예측치와 실험값이 유사한 수치를 나타냈으며, 이는 제안된 구성방정식 및 유한요소해석 모델의 타당성을 보여준다.

(2) 유한요소해석에서 압연판의 중앙은 각 압연 단계에서 초기 두께비가 비교적 일정하게 유지되는 것으로 예측된 반면, 선단부는 Alloy 625 내부식 소재의 두께비가 여러 압연 단계를 지속적으로 거치며 증가하는 것으로 예측되었다.

(3) 위와 같은 선단부 소재간 두께비 변화는 중앙부는 압연판 중심부에서는 변형 상태가 이상적인 평면변형 모드와 유사하게 인가되는 반면, 선단부는 소재간 강도 차이 및 압연팩 초기 형상으로 인해 피시테일 현상과 같은 불균일하고 이상적인평면변형 조건과 다른 변형 모드가 인가되어, 모재의 변형량이 Alloy 625에 비해 크기 때문으로 분석 가능하다.

## 후 기

본 연구는 과학기술정보통신부 재원의 한국연구재단과 (과제번호 RS-2024-00338965) 산업통상자원부 재원의 한국산업기술평가관리원의 (과제번호 20010701) 지원을 받아 수행되었습니다.

## REFERENCES

- [1] Z. Zhang, W. Wang, R. Jiang, C. Kim, W. Tian, Y. Xiong, X. Zhang, Z. Mao, M.-G. Lee, 2022, Tensile behavior of single-crystal superalloy with different structured cooling holes, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 229, 107514.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107514>
- [2] C. Moon, J.Y. Won, K. Lee, J. Lee, S.-W. Kim, M.-G. Lee, 2022, Mechanical behavior and interfacial damage of carbon steel-stainless steel corrosion resisted-alloy (CRA) clad plate: Hybrid analysis based on experiment and finite element modeling, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 852, 143697.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143697>
- [3] Y.G. Choi, The manufacturing of clad steel and its utilization, 1989, *J. Kor. Weld. Soci.*, Vol. 7, No. 3, pp. 7-11.
- [4] S.T. Kim, S.I. Kwun, 1990, Fabrication of stainless clad steel by hot rolling, *J. Kor. Weld. Soci.*, Vol. 8, No. 2, pp. 70-74.
- [5] D.S. Bae, W.J. Kim, S.C. Eom, J.H. Park, S.P. Lee, M.J. Kim, C.Y. Kang, 2011, Effect of Post Heat Treatment on Bonding Interfaces in Ti/STS409L/Ti Cold Rolled Clad Materials, *Trans. Mater. Proc.*, Vol. 20, No. 2, pp. 140-145.  
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2011.20.2.140>
- [6] M.H. Kim, H.J. Bong, J.H. Kim, K.S. Lee, 2022, Optimal Post Heat-treatment Conditions for Improving Bonding Strength of Roll-bonded 3-ply Ti/Al/Ti Sheets, *Trans. Mater. Proc.*, Vol. 31, No. 4, pp. 179-185.  
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2022.31.4.179>
- [7] T.H. Kim, K.S. Lee, J.H. Kim, Y.H. Moon, Y.S. Lee, E.Y. Yoon, 2018, Study About Measurement of Interfacial Bonding Strength of STS/Al Clad sheet by Blanking Process, *Trans. Mater. Proc.*, Vol. 27, No. 5, pp. 267-275.  
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2018.27.5.267>
- [8] J.G. Kim, B.h. Park, S.K. Kim, K.G. Chin, H.S. Kim, 2014, Finite Element Analysis of the R-value of a 2-Layer Clad Steel, *Trans. Mater. Proc.*, Vol. 23, No. 5, pp. 311-316.  
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2014.23.5.311>
- [9] D. Myung, W. Noh, J.-H. Kim, J. Kong, S.-T. Hong, M.-G. Lee, 2021, Probing the Mechanism of Friction Stir Welding with ALE Based Finite Element Simulations and Its Application to Strength Prediction of Welded Aluminum, *Metals Mater. Int.*, Vol. 27, pp. 650-666. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00901-8>
- [10] T.J. Jang, Y.-H. Yoo, J.-B. Kim, Determination of Johnson-Cook model parameters using optimization method, *TERans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 43, No. 12, pp. 951-957.  
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2019.43.12.951>