

레이저 기반 표면 열처리 및 클래딩을 이용한 SUS 316 판재 성형성 향상

조영관*, 유재현*, 정호승**, 박상후***,#

*부산대학교 기계공학부 대학원, **부산대학교 첨단기계부품소재 인력양성사업단,
***부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공연구소

Improving the Formability of an SUS316 Plate using Laser-induced Surface Heat Treatment and Cladding Processes

Yeong-Kwan Jo*, Jae-Hyun Yu*, Ho-Seung Jeong**, Sang-Hu Park***,#

*Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.,

**HRD Center for Advanced Mechanical Parts and Materials, Pusan Nat'l Univ.

***School of Mechanical Engineering, ERC/NSDM, Pusan Nat'l Univ.,

(Received 4 September 2019; received in revised form 6 October 2019; accepted 1 December 2019)

ABSTRACT

We propose a practical method for increasing formability of a sheet metal plate using laser heat treatment (LHT) and cladding process. In this work, two kinds of process such as laser-induced heat treatment and cladding were utilized to evaluate the effect on formability of SUS316 sheets with different thickness of 1 and 3 mm. By using a vertically line-patterned tensile specimen that was LHTed or cladded on its surface, the process parameters of each surface treating method were studied and optimized. Through the basic test, we knew that the laser power of 900 W and scanning speed of 500 mm/min was the best condition for increase of formability. As the treatment results, ultimate tensile strength and elongation were increased as approximately 2.1 and 7.0%, respectively. To verify the usefulness of this work in industrial cases, we conducted a bulging test using with and without LHTed SUS316 sheet metal blanks. The results show that the bulging height of LHTed sheet was increased by 73% compared to that of the original one.

Key Words : Surface Treatment(표면처리), Laser Heat Treatment(레이저 열처리), Bulging Test(벌징실험), Formability(성형성), Elongation(연신율)

1. 서 론

레이저 표면 열처리 (laser induced heat treatment) 기술은 다양한 산업 분야에서 내마모성, 내식성, 고강도 등의 기계적 특성 개선을 위해 적용되었다.

기존의 연구로는 C. Navas 등은 고출력 레이저를 이용하여 마르텐사이트계 스테인리스 강 (AISI 431)과 몰리브덴 함량이 높은 고속 강 (AISI M2)의 경도를 각각 약 30% 및 40% 수준으로 향상시켰다^[1]. G. Telasang 등은 고출력 연속파 다이오드 레이저를 이용한 AISI-H13 공구강의 표면처리를 통해 연신율을 0.53% 향상시켰다^[2].

또한 박판의 성형성 (formability) 향상과 관련한

Corresponding Author : sanghu@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-1011, Fax: +82-53-581-2295

연구로는 J. Soeiro 등의 연구에서 제안한 SPIF (single point incremental forming) 공정을 통하여 균열에 의한 메커니즘을 확인하고, 성형성 개선에 대한 연구하였다^[3]. Y. Lim 등은 PET (polyethylene terephthalate)와 PVC (polyvinyl chloride)로 코팅된 판금 인 비닐 코팅 금속 (vinyl coated metal, VCM)의 성형성에 대한 연구를 진행하였다. 이를 통하여 비닐 코팅 금속이 GI steel 대비 2.5배의 변형률 제어를 할 수 있었다^[4]. J. Ke 등은 WDQ steel 소재의 박판에 비드를 적용하기 위해서 성형성에 대한 연구를 진행하였다^[5]. J. S. Suh 등은 ECAP (equal channel angular pressing) 처리된 AZ31 시트의 성형 거동에 대한 다양한 전단 패턴의 영향에 관한 연구를 하였다^[6]. Z. Shao 등은 금속의 열-기계적 반응을 분석하였다^[7]. 그 이외에도 박판 소재의 성형성 향상 및 예측을 위한 다양한 연구가 진행이 되어왔다^[8-14].

이전 연구에서는 성형성 향상 및 예측을 위한 연구에 중점을 두고 있다. 본 연구에서는 간단히 레이저 열처리 공정을 이용한 국부적인 패턴생성과 국부적인 물성제어를 통해서 얇은 판재의 성형성을 향상시킬 수 있는 공정을 연구했다.

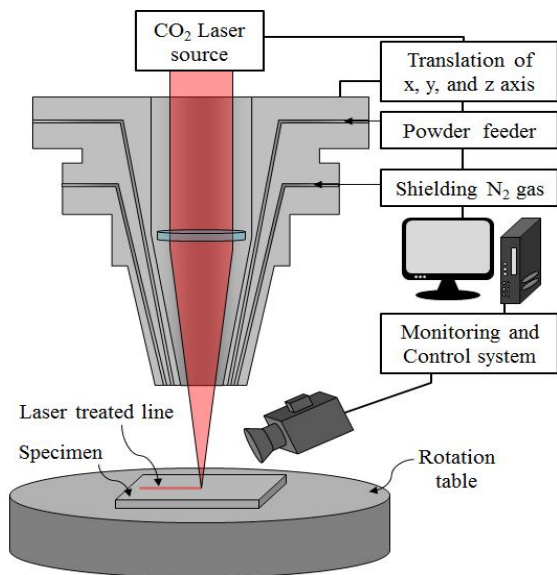


Fig. 1 Schematic diagram of DED (direct energy deposition) equipment and process

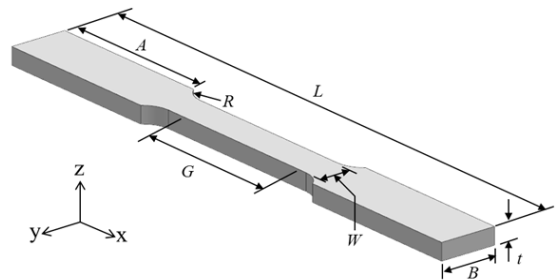


Fig. 2 Tensile test specimen (ASTM E8/E8M)

Table 1 Dimensions of tensile test specimen

Experimental condition	
Gage length (G)	25
Width (W)	6
Radius of fillet (R)	6
Overall length (L)	100
Length of grip section (A)	32
Width of grip section (B)	10
Thickness (t)	1

2. 기계적 물성 실험

2.1 레이저 표면 열처리 및 클래딩

본 연구에서 레이저 열처리 공정을 적용하기 위해 Fig. 1에 나타낸 것과 같은 DED (direct energy deposition) 장비 (MX3, Insstek Co., Korea)를 이용하였다. DED 장비의 고풍력 레이저는 금속 기판 표면을 용융시켜주는 열원으로 사용된다. 운영 소프트웨어 MX-CAM으로 제어되는 5축 수치 제어 (CNC) 장치가 있으며, 열원은 1.0 mm 직경의 4 kW CO2레이저 빔이다. 또한 분말을 분사하기 위한 분말 분사 장치와 클래딩 (cladding)시 N2 가스를 분사하여 산화를 방지한다. 실시간 모니터링을 위하여 CCD (Charge-coupled device) 카메라가 설치되고 노즐과 기판 사이의 거리를 9.0 mm로 제어한다. 이번 시험에서는 기초시험을 위하여 클래딩 공정과 레이저만을 조사한 레이저 표면 열처리를 적용하여 비교 분석하였다. 또한 클래딩은 모재와 동일 소재인 SUS 316을 적층하였으며, 높이는 0.25 mm 적층되었다.

레이저 열처리 적용에 따른 연신율의 변화에 대

한 확인을 위한 기초실험으로 인장시험을 진행하였다. 인장시험은 ASTM E8/E8M[15]의 국제 규격에 따라 Fig. 2와 Table 1과 같이 시험편 제작을 하였으며, 만능재료시험기 (R&B Co., Universal Testing Machine, Korea)를 사용하여 실험하였다.

2.2 레이저 표면처리 영향 분석

시험편 기준으로 길이방향으로 레이저 표면 열처리와 클래딩을 적용한 인장 시험편을 통하여 레이저 파워의 최적화를 진행하였다. 수직방향으로 표면처리한 시험편의 파단 형태는 Fig. 3(a)와 같이 나타났으며, Fig. 3(b)와 같이 인장강도 및 연신율을 얻을 수 있었다. 또한 클래딩 공정의 경우 레이저 파워 900 W로 최적화한 공정을 통하여 적층하였을 때 인장강도 2.4%, 연신율은 약 7.3% 향상되었다.

Fig. 4(a)는 레이저 열처리된 시험편에 대한 경도 측정 결과를 표현한 그래프이다. 그림에 나타내었듯이 레이저 열처리한 경우의 경도는 레이저 파워가 900 W로 열처리가 된 부분 (b1, b2, b3)은 모재 대비 40% 향상되었다. 또한 Fig. 4(b)는 클래딩 된 시험편에 대한 경도 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 그림과 같이 표면경도가 모재대비 34% 향상되었다.

이러한 결과에서 알 수 있듯이 900 W의 레이저 출력을 이용한 표면 열처리와 클래딩을 적용할 경우, 표면처리에 따른 경도의 증가가 이루어지고, 이는 인장강도의 증가에도 연관된다는 것을 알 수 있다. 이를 기반으로 우리는 900 W의 레이저 출력을 이용하여 모든 실험을 진행하였다.

또한 본 결과에서 두께가 1 mm의 두께에서는 UTS 및 변형률이 향상되었지만, 3 mm 두께의 경우에는 향상이 나타나지 않았다. 이는 레이저 열처리의 효과가 일반적으로 표면처리된 두께방향 깊이 (d_r)가 전체 두께의 20% 이상일 경우 가장 효과적일 것이라고 판단할 수 있었다.

2.3 레이저 표면처리에 따른 미세조직 분석

레이저 표면처리에 따른 미세조직을 분석하기 위하여 Optical microscopy (OM)를 이용하여 측정된 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 레이저 열처리로 인한

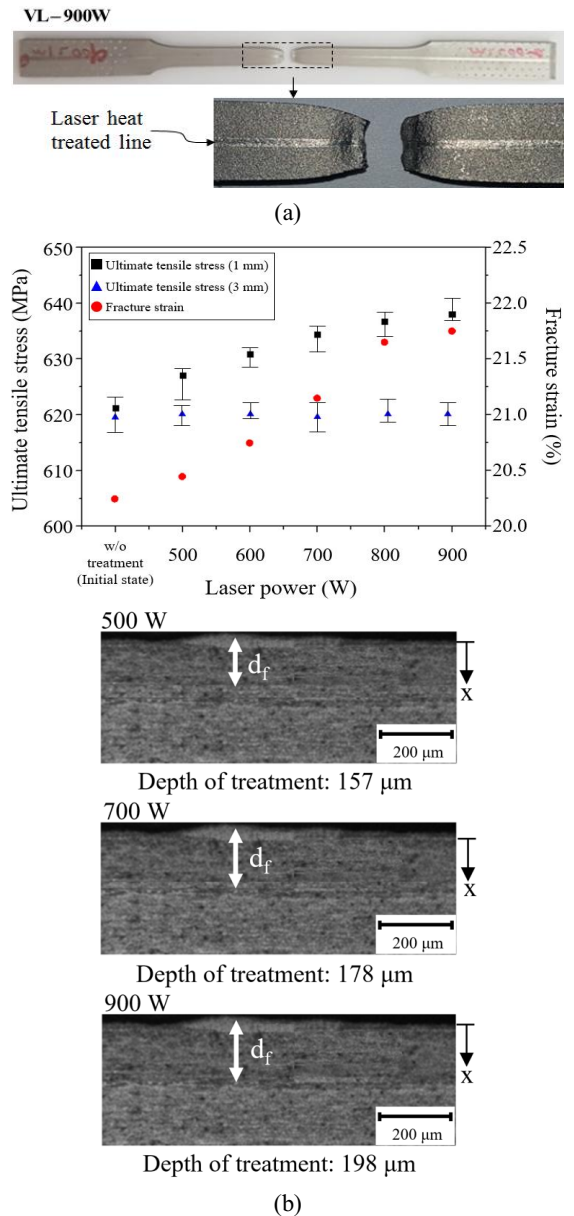
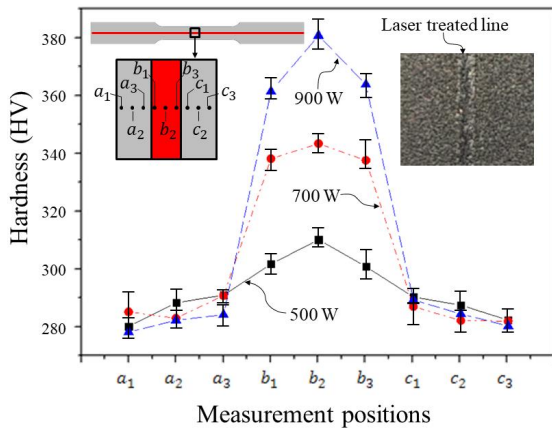
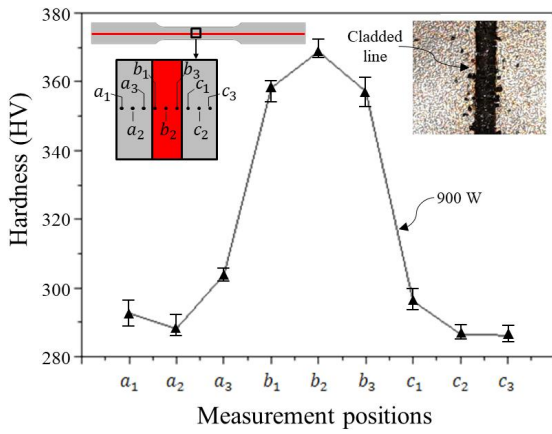


Fig. 3 Tensile test results of laser heat treated specimen under laser power of 900 W: (a) photograph of fractured specimen and (b) variation of ultimate tensile strength according to heat treated laser power (upper), and cross-sectional images of heat treated depth (below)



(a)

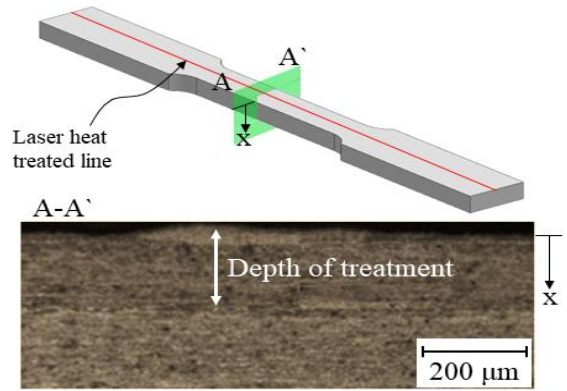


(b)

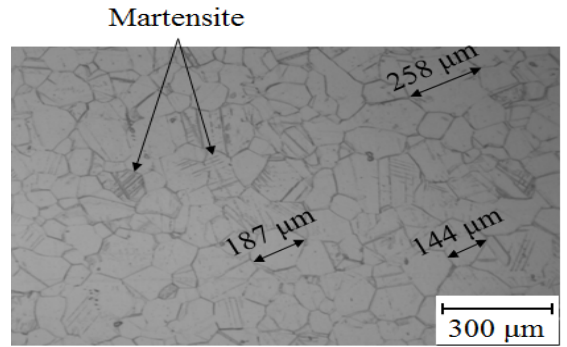
Fig. 4 Hardness test results of laser heat treated specimen of (a) laser heat treated specimen and (b) clad specimen

열 영향부는 $198 \mu\text{m}$ 로 나타났으며, 전체 두께 대비 약 20% 만큼의 효과를 나타내었다 (Fig. 5(a) 참고).

또한 Fig. 5(b)의 OM 사진에 나타난 단면의 깊이 방향 그레인 크기를 확인 해 보면 전체적으로 그 크기가 작아진 것을 확인할 수 있다. 레이저열처리가 되기 전의 그레인 크기는 약 $300 \mu\text{m}$ 이며, 표면 처리를 하고 난 뒤의 경우에는 약 $200 \mu\text{m}$ 로 약 33% 작아졌다. 그리고 마르텐사이트 (Martensite) 조직이 부분적으로 나타나게 되며, 이로 인해 열처리된 부분의 강화가 되었을 것으로 판단된다^[16].



(a)



(b)

Fig. 5 Cross-sectional microscopy image of specimen by laser heat treatment; (a) depth of heat treatment and (b) grain size distribution of heat treated surface

3. 성형성 해석

3.1 해석 모델링 및 해석 조건

본 연구에서는 레이저 표면 열처리에 따른 성형성을 분석하기 위해서 파단이 일어날 가능성이 큰 부분을 해석을 통하여 확인하였다. 해석에서 사용된 모델은 Fig. 6과 같이 성형성 시험의 판재와 펀치형상을 구현하였다.

Ansys V19.0을 사용하여 해석을 진행하였다. 해석을 위한 판재 소재는 실제 모재인 SUS 316 소재를 사용하였고, 실제 펀치에 적용되는 SKD 61 금형강을 사용하였다. 또한 해석을 위해 Fig. 7과 같이 판재는 0.2 mm 로, 펀치는 1 mm 의 유한요소 모

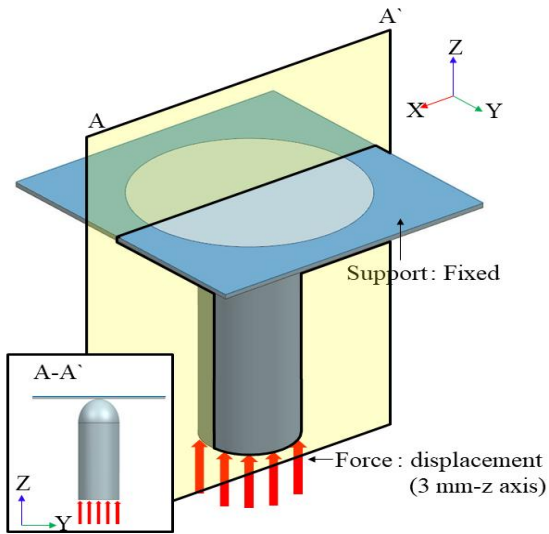


Fig. 6 Analysis model and boundary conditions for bulging test

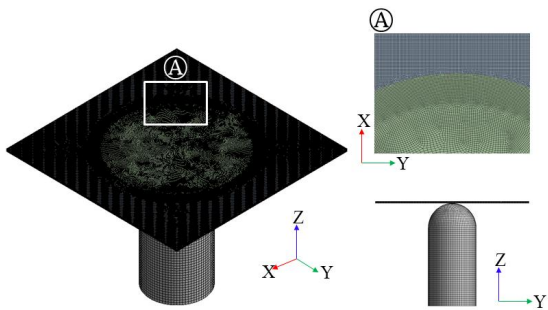


Fig. 7 Finite element model for forming analysis: section A is interface of fixing part and deformed part

델을 만들었다. 육면체 요소를 사용하였고, 판재부는 약 68만개, 펀치부는 약 4만개의 요소로 해석을 진행하였다. 또한 A에서는 판재에서 다이가 판재를 고정하는 부분과 펀치로 인해 변형이 되는 부분의 연결부에서의 유한요소 모델을 나타내었다. 해석 조건은 Fig. 6에 나타내었듯이 성형성 실험과 같은 조건으로 경계조건으로 주어 금형으로 고정되는 금형과 접촉부를 모두 고정하였다. 25 mm 직경의 반구형 펀치를 Z축 방향으로 총 3 mm 이동하는 조건으로 해석하였다.

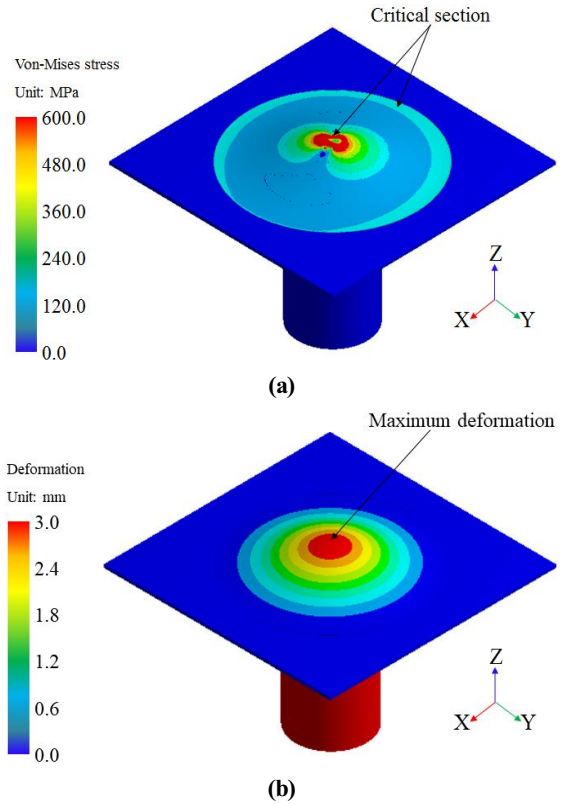


Fig. 8 FE-analysis result of bulging; von-Mises stress distribution (upper), and deformation distribution (below)

3.2 해석결과

본 해석의 결과인 Fig. 8에 나타나 있듯이 높은 하중을 받는 부분은 중심부와 금형이 고정하고 있는 부분의 주변에서 높은 하중을 받게 된다. 그중에서도 중심부의 펀치가 시험편을 밀어 올리는 부분에서 더 높은 응력이 나타났다. 이를 통하여 응력이 높게 나타나는 부분들에 대하여 레이저 표면 열처리 적용이 필요할 것으로 예상된다.

4. 성형성 실험

4.1 시험조건

본 연구에서는 Fig. 9와 같은 벌징(bulging) 시험을 진행하였다. ASTM E2712-15 에 따라 시험하였으며,

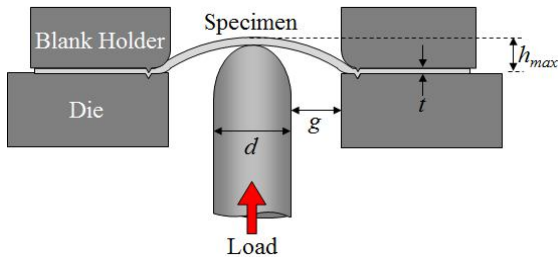


Fig. 9 Schematic diagram of bulging set-up: g is gap between die and punch, d is punch diameter

Table 2 Experimental conditions for bulging test

Experimental condition	
Specimen size (mm)	80×80
Specimen thickness, t (mm)	1
Punch diameter, d (mm)	25
Gap between die and punch, g (mm)	17.5

실험조건은 Table 2에 나타내었다. 사용된 시험편의 크기는 80×80 mm, 펀치와 다이와의 거리 (gap, g)는 17.5 mm이고, 펀치의 지름은 25 mm 이다.

또한 시험편은 레이저 열처리 패턴에 따라 3가지 형태로 제작하여 시험편의 열처리 형상을 Fig. 10에 나타내었다. Case-1은 표면처리 하지 않은 경우, Case-2는 과단이 일어날 것으로 판단되는 중심부에 열처리를 적용한 경우, Case-3으로 지름 60 mm의 큰 원형으로 레이저 열처리를 적용한 경우의 시

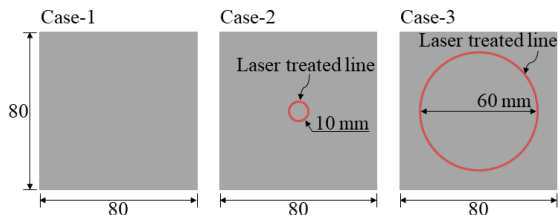


Fig. 10 Rectangular blank shape (80×80 mm) and laser heat treated line: Case-1 is initial blank (no treatment); Case-2 is laser treated blank at center with 10 mm diameter circle; Case-3 is surface treated blank with 60 mm diameter circle at edge

험편을 제작하였다. 그리고 변형률 측정을 위하여 시험 전 상태의 박판 표면에 전해에칭 공정을 이용하여 1×1 mm 크기의 사각형 그리드를 형성하였다.

4.2 성형성 시험 결과

본 실험에서는 표면처리를 하지 않은 시험편, 클래딩과 레이저 열처리한 시험편을 시험하였다. 레이저 열처리 공정 모두 인장강도 및 연신율이 유사

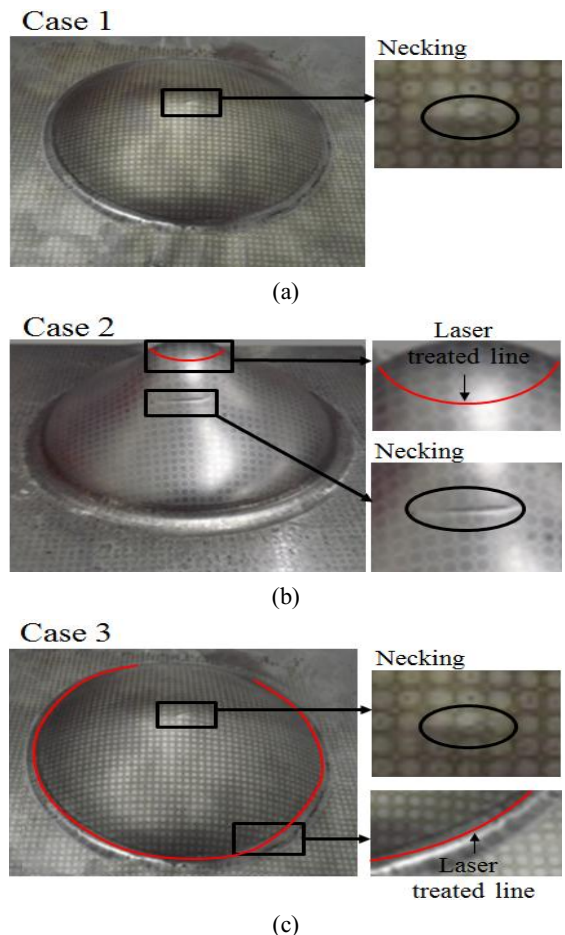


Fig. 11 Bulging test results; (a) Case-1: without surface treatment, $h_{max}=25$ mm, (b) Case-2: center circle pattern by laser heat treatment, $h_{max}=43$ mm, (c) Case-3: edge circle pattern by laser heat treatment, $h_{max}=30$ mm

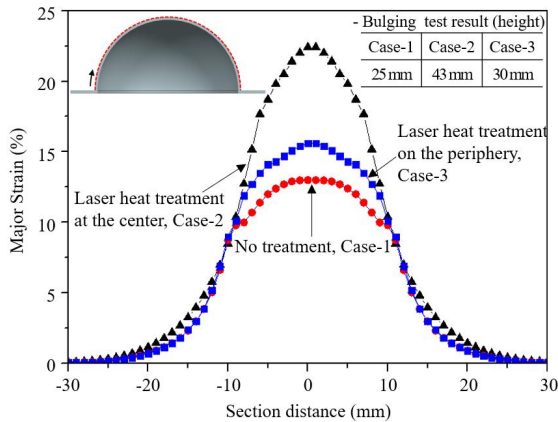


Fig. 12 Major strain distributions according to cross-sectional direction

한 상승률을 나타냈다. 그러나 레이저 열처리 공정이 클래딩 공정에 비해 저렴하기 때문에 우리는 두 가지 공정 중 레이저 열처리 공정만을 적용한 시험편을 제작하여 시험을 진행하였다.

Fig. 11은 별징시험 중 네징이 발생하기 시작하는 순간의 시험편 사진이다. Fig. 11(a)의 표면처리를 하지 않은 시험편은 25 mm, Fig. 11(b)의 외곽부에 레이저 열처리를 한 시험편은 43 mm까지 늘어났다. 또한 마지막으로 Fig. 11(c)의 중심부 근처 레이저 열처리한 시험편은 30 mm까지 늘어났다. 연신율의 증가는 적용된 얇은 기판의 성형성 향상에 영향을 준다는 것을 알 수 있었다. 열처리된 부분의 인장강도가 증가하기 때문에 그 부분에서의 안전성 또한 확보될 수 있다.

Fig. 12은 별징시험된 시험편의 변형률 분포 결과를 표현한 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 레이저 열처리된 시험편이 표면처리가 되지 않은 시험편 대비 높은 변형률을 가진다. 또한 중심부에 열처리된 부분에서는 더욱 높은 변형률이 생기는 것을 확인할 수 있다. 이는 레이저 열처리를 통하여 부분 레이저 열처리 공정을 통한 성형성 향상과 표면강화도 동시에 가능함을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 레이저 열처리 공정의 적용을 통

해 연신율이 향상되고, 제품의 성형성을 개선하였다. SUS 316 기판에 대한 레이저 열처리 공정 적용에 따른 기계적 거동에 대한 분석을 위한 인장시험을 진행함으로써 다음과 같은 결론을 이끌어 낼 수 있었다. 레이저 열처리의 경우 7.2%의 인장강도와 10%의 연신율 향상을 나타냈고, 파단부분은 표면처리가 적용 되지 않은 부분에서 나타났다. 또한, 별징시험 실험결과에서 표면처리가 적용된 경우 별징 높이가 43 mm로 표면처리 하지 않은 경우보다 약 72% 증가됨을 알 수 있다. 따라서 레이저 표면처리를 통해서 다양한 산업분야에서 얇은 금속판재 성형성 향상에 도움이 될 것이라고 판단하였다.

후 기

이 연구는 2018년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구(20000201)이며, 또한 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 (No.2017R1D1A1A09000923)의 지원을 받아 수행한 성과입니다.

REFERENCES

1. Navas, C., Conde, A., Fernández, B. J., Zubiri, F. and Damborenea, J., "Laser coatings to Improve Wear Resistance of Mould Steel," *Surface and Coating Technology*, Vol. 194, pp. 136-142, 2005.
2. Telasang, G., Dutta, Majumdar, J., Padmanabham, G., Tak, M. and Manna, I., "Effect of Laser Parameters on Microstructure and Hardness of Laser Clad and Tempered AISI-H13 Tool Steel," *Surface and Coating Technology*, Vol. 258, pp. 1108-1118, 2014.
3. Sociro, J., Silva, C., Silva M. B. and Martins, P., "Revisiting the Formability Limits by Fracture in Sheet Metal Forming," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 217, pp.184-192, 2015.
4. Lim, Y., An, T., Ko, S. and Kim, N.,

- “Formability of Coated Vinyl on Sheet Metal during Deep Drawing Process,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 227, pp. 178-189, 2016.
5. Ke, J., Liu, Y., Zhu, H. and Zhang, Z., “Formability of sheet metal flowing through drawbead—an experimental investigation,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 254, pp. 283-293, 2018.
 6. Suh, J., Victoria-Hernández, J., Letzig, D., Golle, R. and Volk, W., “Effect of processing route on texture and cold formability of AZ31 Mg alloy sheets processed by ECAP,” *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 669, pp. 159-170, 2016.
 7. Shao, Z., Li, N., Lin, J. and Dean, T., “Formability evaluation for sheet metals under hot stamping conditions by a novel biaxial testing system and a new materials model,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 120, pp. 149-158, 2017.
 8. Gao, T., Liu, Y., Chen, P. and Wang, Z., “Analysis of bulging process of aluminum alloy by overlapping sheet metal and its formability,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 25, pp. 1050-1055, 2015.
 9. Li, H. Z., Li, G. Y., Gao, G. Q., Zhang, W. S. and Wu, X., “A formability evaluation method for sheet metal forming with non-linear strain path change,” *International Journal of Material Forming*, Vol. 11, pp. 199-211, 2018.
 10. Liu, J., Peng, Q., Liu, Y. and Wang, Z., “Viscous pressure bulging of aluminium alloy sheet at warm temperatures,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 10, pp. 1505-1511, 2007.
 11. Hussain, G., Hayat, N. and Lin, G., “Pyramid as test geometry to evaluate formability in incremental forming: Recent results,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, pp. 2337-2345, 2012.
 12. Nguyen, D. T. and Kim, Y. S., “Improving formability of tube bending for a copper material using finite element simulation,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, pp. 4205-4211, 2015.
 13. Kang, D. M., Hwang, J. K., El-Morsy, A. M. and Manabe, K., “A study on the formability of Magnesium Alloy in warm temperature,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 2, pp. 84-90, 2003.
 14. Kang, D. and Manabe, K., “Improvement on the Formability of Magnesium Alloy Sheet by Heating and Cooling Method,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 9, pp. 66-70, 2005.
 15. ASTM International (2008), “ASTM E 8/E 8M-08, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials,” —Retrieved 2016.
 16. Stamm, H., Holzwarth, U., Boerman, D. J., Dos Santos, Marques, F., Olciuni, A. and Zausch, R., “Effect of laser surface treatment on high cycle fatigue of AISI 316L Stainless steel,” *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 19, No. 8, pp. 985-995, 1996.