

심리스 튜브 제조과정 시 피어싱 플러그의 파손거동

임영빈[†] · 윤정모

전북대학교 신소재공학부 금속공학과 대학원

Failure Behavior of Piercing Plug during Seamless Tube Manufacturing Process

Young-Bin Lim[†], Jeong-Mo Yoon

Graduate School of Metallurgical Engineering, Division of Advanced Materials Engineering,
Chonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

Abstract In this study, failure behavior of piercing plug for seamless tube manufacturing process was studied. Three different kinds of passed piercing plugs (10, 90, 215 times) were prepared. The shape deformation of the passed piercing plugs was observed by 3D coordinate measuring machine, and the oxidized layer on the surface of piercing plug was observed by optical microscopy. The length reduction of piercing plug presented at 215 times passed plug. It was found that the oxidized layer consisted of outer scale, inner scale and internal oxidation layers, and the inner scale layer had vertical cracks, and interfaces had horizontal cracks. We proposed the failure mechanism of piercing plug during seamless tube manufacturing process based on the formation of vertical and horizontal crack.

(Received August 10, 2017; Revised August 22, 2017; Accepted August 29, 2017)

Key words : Seamless tube, Piercing plug, Piercing pass, Iron oxide layer, Failure behavior

1. 서 론

화력 발전용 보일러에 사용되는 심리스 튜브(seamless tube)는 고온으로 가열된 원형 빌렛(billet)을 피어싱 플러그 공구(piercing plug tools)로 천공하여 제작한다. Fig. 1에 도시한 것과 같이, 심리스 튜브의 제작과정 중에 피어싱 플러그는 상대재인 고온의 빌렛과의 접촉으로 인해 고온과 고하중을 받는 동시에 피어싱 반복공정에 의해 변형과 표면의 균열이 발생하게 된다[1]. 이러한 피어싱 플러그의 변형과 표면균열은 플러그 공구의 수명과 심리스 튜브의 내부품질을 저하시켜 결과적으로 효율적이고 경제적인 심리스 튜브 생산을 어렵게 하는 원인이 되고 있다[2, 3]. 이에 따라 피어싱 플러그 수명 향상을 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다.

피어싱 플러그의 수명 향상을 위한 연구 중 Yoshida 등이[1] 3D FEM(Three Dimensional Finite

Element Method) simulation으로 분석한 피어싱 플러그의 위치별 온도와 응력분포 연구결과에 따르면, 플러그의 위치에 따라 피어싱 공정 중에 플러그에 가해지는 응력과 열부하가 다르다는 것이 보고되었다. 1250°C로 가열된 빌렛을 피어싱할 때, 플러그의 최첨단부는 900~1000°C까지 온도상승이 이루어지고, 하단부위로 내려갈수록 온도의 상승이 둔해져 최하단부위에서는 200~300°C의 온도상승만이 나타나며, 접촉위치별로 인가되는 응력의 차이 또한 관찰되었다.

한편, Ohnuki 등은[4] 플러그 표면산화층의 단열 효과에 주목하였다. Ohnuki 등은 피어싱 공정하에 표면산화층이 없는 플러그의 내부온도는 상대재인 빌렛으로부터 열이 전달되어 고온으로 가열되는 반면, 표면산화층이 있는 플러그의 내부온도는 상대적으로 낮은 온도를 유지한다고 보고하였다. 즉, 표면산화층이 고온으로부터 플러그 기지금속을 보호해주는 단열

[†]Corresponding author. E-mail : yblim@jbnu.ac.kr
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

역할을 수행한다고 보고하였다[4, 5]. 앞서 언급된 연구결과를 통해, 심리스 튜브 제조공정 중에 피어싱 플러그의 위치에 따라 온도상승 및 응력부하가 다르다는 것과 표면산화층에 의한 기지금속의 보호 효과가 확인되고 있다. 특히 플러그 침단부는 고온의 피어싱 공정으로 인한 용손(melt-out)등의 변형과 표면산화층의 파손으로 인해 기지금속의 온도변화가 가장 크게 일어나기 때문에, 피어싱 플러그의 수명향상을 위해 플러그 침단부에 대한 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다. 그러나 현재까지 피어싱 플러그 수명향상 연구의 기초가 되는 침단부의 파손거동에 대한 구체적인 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 실제 심리스 튜브 피어싱 공정을 10, 90, 215회 실시한 플러그의 최침단부(plug tip)에서 시편을 채취하여, 피어싱 공정에 의한 플러그의 파손거동을 단열역학에 효과적인 표면산화층의 변화와 연관지어 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 실제 피어싱 공정이 10, 90, 215회 진행된 세 조건의 플러그를 준비하여 비교분석하였다. 단열을 위하여 산화층을 인위적으로 생성시킨 플러그들을 실험에 이용하였다. 고온 피어싱 공정 중에 상대재료로부터 전달되는 온도의 상승을 최소화하기 위해, 매 회의 피어싱 공정 후 water spray로 플러그 표면을 냉각하였다. 본 연구에서 사용된 플러그의 성분분석결과를 Table 1에 나타내었다. 피어싱 플러그 내부에서 드릴 가공으로 10g의 칩(chip)을 제작하여, 에탄올에서 10분간 초음파세척 후 대기 중에서 건조하여 습식분석을 실시한 결과, Table 1과 같이 플러그의 성분은 0.19C-2.92Ni-1.34Cr-0.27Mo-0.13W강으로 확인되었다.

피어싱 횟수에 따른 플러그의 파손분석을 위하여 우선적으로 3차원 형상측정기(three dimensional coordinate measuring machine, VICTOR, Dukin)

를 이용하여 각 플러그의 형상변화와 침단부의 곡률 반경을 측정하였다. 이 후, 변형정도가 가장 높은 각 플러그의 최침단부(plug tip)로부터 시편을 채취하여 비교분석하였다. 플러그 표면산화층의 변화와 미세조직의 변화를 알아보기 위하여 채취한 각각의 시편 단면을 광학현미경(optical microscopy, DE/DM ILM, Leica)과 에너지 분산 분광계(energy dispersive spectrometer)가 부착된 주사 전자현미경(scanning electron microscope, S-4800, Hitach)을 통하여 관찰하였으며, X선 회절 장치(X-ray diffractometer, MAX-2500, Rigaku)로 시편 표면에 형성된 상을 분석하였다. 이상의 분석 결과를 토대로 10, 90, 215회 피어싱 후 플러그의 파손거동을 표면산화층의 변화와 연관지어 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3차원 형상측정기로 피어싱 횟수별 플러그의 형상을 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 10회, 90회, 215회 피어싱 후 플러그의 전체길이는 각각 511.66 mm, 520.44 mm, 509.47 mm로, 10회 플러그 기준으로 90회 피어싱 진행 시 8.78 mm의 길이가 증가하였으며 215회 피어싱 진행 시 2.19 mm 감소되었다. 또한 90회 플러그에서만 외부에 중심축을 가지

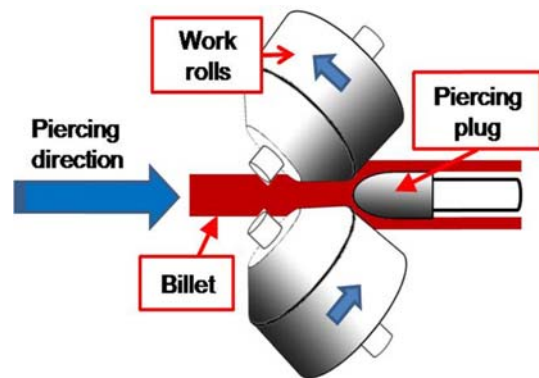


Fig. 1. Schematic diagram of the piercing process.

Table 1. The chemical compositions of the piercing plug (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V	Fe
Piercing Plug	0.19	0.83	0.37	0.02	0.01	1.34	2.92	0.27	0.13	0.01	Bal.

는 곡률반경(R316.42)이 관찰되었다. 즉, 90회의 피어싱 공정 진행 시 R316.42의 접촉위치에서 높은 응력을 받아 최첨단부가 날카로운 형상으로 변형되었으며, 이 후 215회의 피어싱 진행 시 최첨단부가 완만한 형상으로 변형되며 길이감소가 나타난 것으로 판단된다.

3차원 형상측정 결과로 나타난 변형의 구체적인 분석을 위하여 각 플러그 최첨단부 시편의 단면을 광학현미경을 이용하여 표면산화층의 변화를 비교 관찰

하였다. 그 결과, 10회 피어싱 후 플러그는 Fig. 4(a)와 같이 312 μm 두께의 다층으로 구성된 산화층을 확인 할 수 있었다. 관찰된 산화층은 Fig. 4(c)에 나타난 바와 같이 최상부 표면에 존재하는 다량의 기공이 포함된 외부피막(outer scale)과 산화물들이 혼합되어 분포한 내부피막(inner scale)으로 구분할 수 있었으며, 기지금속과 산화층 경계에서는 기지금속으로의 산소 확산에 의한 내부산화(internal oxidation) 영역이 관찰되었다. 내부피막 내의 하얀색 조직들은, 산화층 생성을 위한 열처리 시 플러그 내부에서 Ni 원자의 확산 및 응집에 의한 결과이다 [5]. 10회 피어싱 플러그 시편 전체적으로 산화층 내에서만 수직 미세균열은 관찰되었으며 기지금속으로의 침투는 나타나지 않았다. 90회 피어싱 플러그 시편의 단면을 관찰한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(b)에서 보이는 바와 같이 내부산화영역이 기지금속 내부로 침투한 것을 확인하였으며, 기지금속과 산화층의 경계영역에서 산화물로 채워진 수평의 균열이 관찰되었다(Fig. 5(c)). 또한 Fig. 5(a)에서 보이는 바와 같이 일부 외부피막의 박리(spalling)와 함께 외부피막/내부피막의 경계에서의 수평 균열도 확인되었다. 기지금속 내로 전파된 수직의 미세균열을 따라 산소의 확산이 수월해져 내부산화영역이 기지금속 내부로 침투하였으며, 반복적인 고온 피어싱 공정 중 생성된 수직 및 수평의 균열 내부에 재산화 발생하면서 산화물로 채워진 것으로 판단된다. 한편, 추가적인 고온 피어싱 공정이 진행된 215회 플러그의 경우(Fig. 6), 박리 및 마모에 의해 대부분의 산화층이 파손되어 기지금속의 외부노출이 나타났으며 기지금속과 잔존하는 산화층 경계를 따라 균열

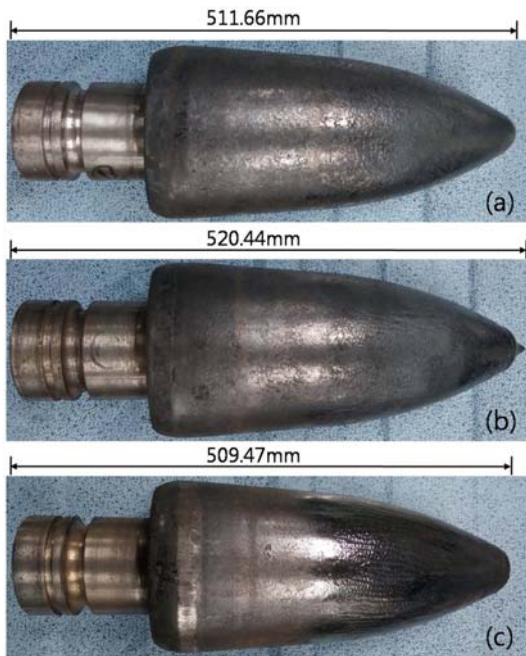


Fig. 2. The piercing plug; (a) plug after 10 pass piercing, (b) plug after 90 pass piercing, (c) plug after 215 pass piercing.

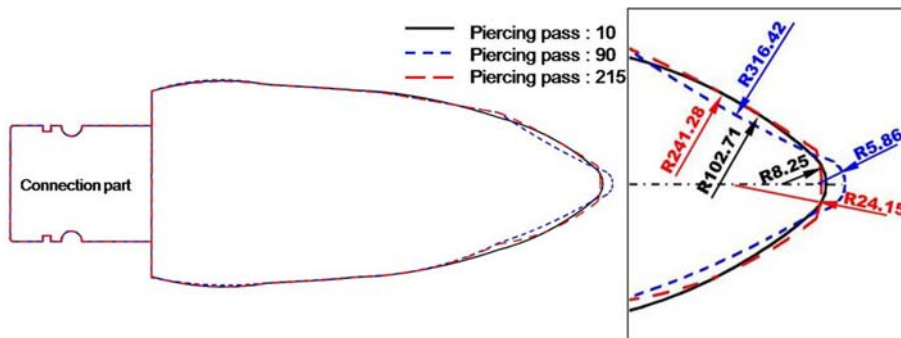


Fig. 3. Shape and radius of curvature of plug after 10, 90 and 215 pass piercing.

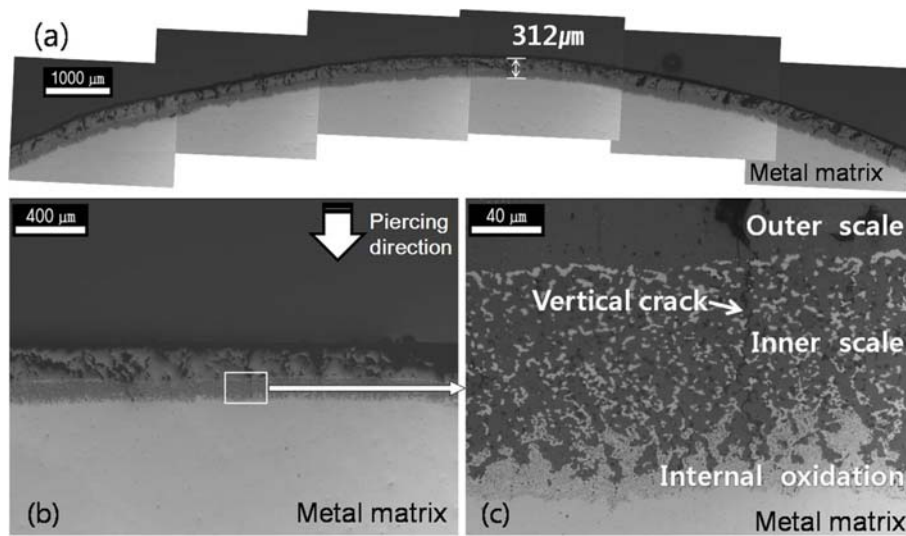


Fig. 4. Cross-sectional images of plug tip after 10 pass piercing.

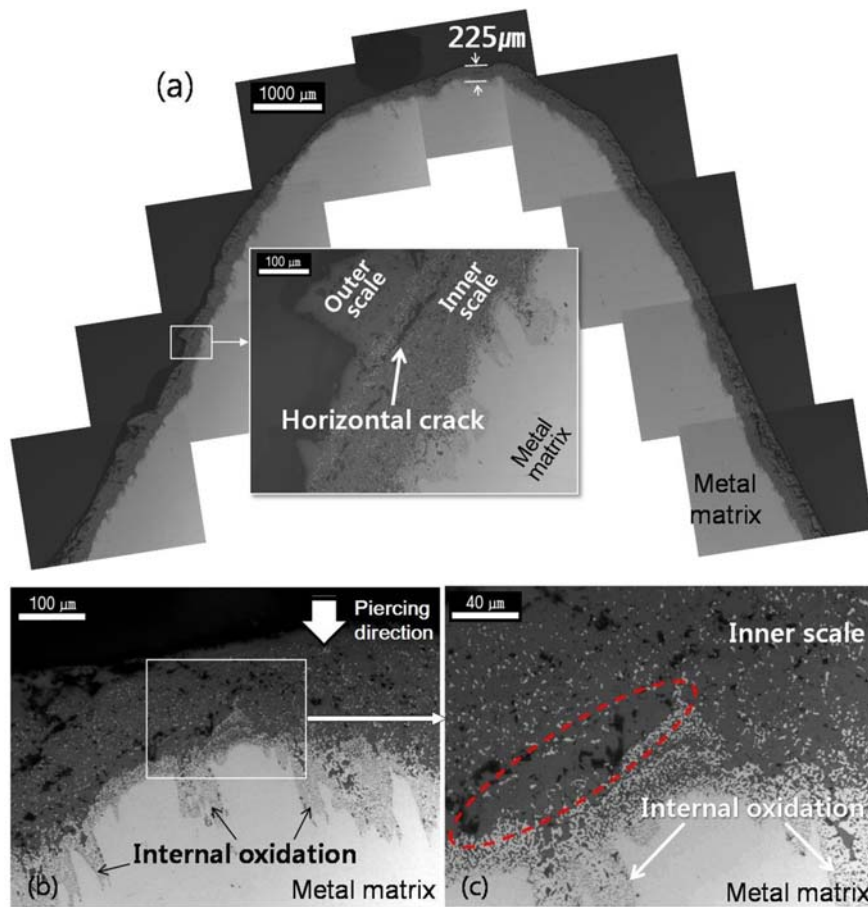


Fig. 5. Cross-sectional images of plug tip after 90 pass piercing.

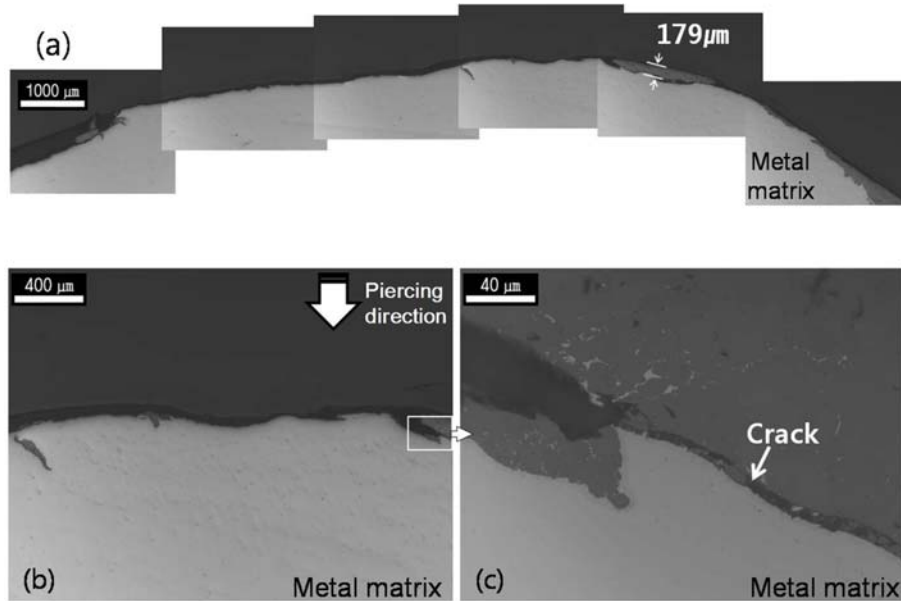


Fig. 6. Cross-sectional images of plug tip after 215 pass piercing.

이 관찰되어(Fig. 6(c)), 추가적인 고온 피어싱 공정이 진행될 경우 상대재인 빌렛과의 금속간 접촉에 의해 피어싱 플러그의 파손이 가속화 될 것으로 판단된다.

피어싱 플러그의 최첨단부 표면에 형성된 산화층의 결정상을 분석하기 위하여 각각의 시편표면을 XRD 분석을 수행하여 Fig. 7에 나타내었다. 피어싱 플러그의 산화층은 Fe_2O_3 (Hematite), Fe_3O_4 (Magnetite), FeO (Wustite)로 구성되었다고 판단된다[6-8]. 플러그 전체적으로 피어싱 횟수가 증가함에 따라 산화층의 두께 감소와 함께 박리 및 마모에 의해 표면에 가까운 Fe_2O_3 와 Fe_3O_4 가 감소되었으며, 215회 플러그 시편의 XRD 분석 결과에서 Fe(iron)가 가장 높게 나타난 것은 Fig. 6과 같이 산화층의 파손으로 기지 금속의 표면이 외부로 노출된 결과이다. Fig. 6(c)에서 보이는 바와 같이 215회 플러그의 산화층은 10회 및 90회 플러그 산화층의 구조와 다르게 나타났으나, XRD 분석 결과에서는 기지금속인 Fe와 함께 Fe_2O_3 , Fe_3O_4 및 FeO 가 같이 검출되었다. 215회 플러그의 노출된 기지금속 표면에서 Fe와 O 이온의 확산에 의한 산화층의 재성성이 이루어지는 동시에, 박리 및 마모된 산화물이 혼합되어(mixed) 노출된 기지금속 표면에 잔존한 것으로 판단된다.

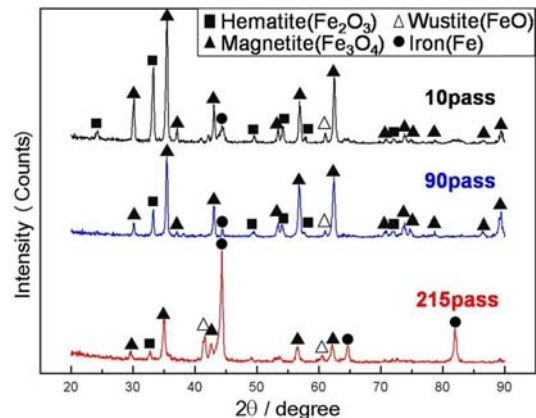


Fig. 7. X-ray diffraction patterns of plugs after 10, 90 and 215 pass piercing.

피어싱 플러그 시편의 미세조직을 관찰하기 위하여 3% Nital 용액으로 에칭을 실시한 후 광학현미경 관찰을 수행한 결과, 215회 플러그에서 Fig. 8과 같이 플러그 기지조직이 마르텐사이트 미세조직과 함께 시편 표면부에 페라이트와 펄라이트 혼합조직이 관찰되었다. 또한 215회 플러그에서 관찰된 기지조직과 혼합조직을 두 영역으로 나누어 EDS 분석을 실시한 결과 Fig. 9와 같이 두 조직의 화학성분이 다름을 확인할 수 있었다. 특히 Ni의 유무가 극명하게 나타

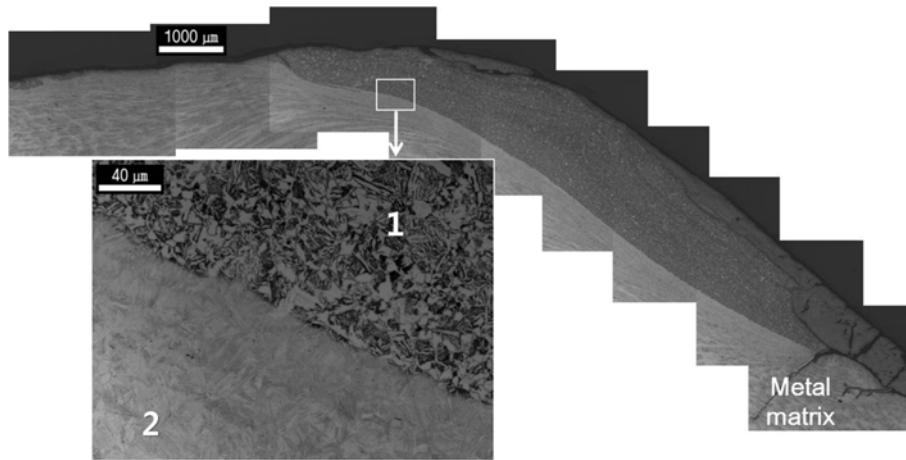


Fig. 8. Optical micrographs showing microstructure of cross-section of plug tip after 215 pass piercing (1) Ferrite & Pearlite and (2) Martensite.

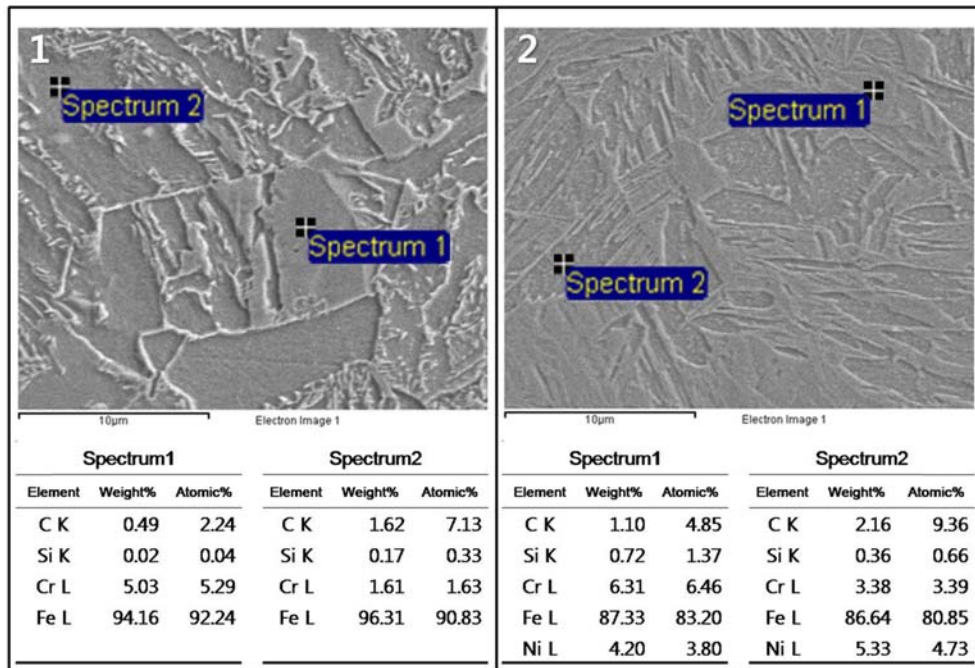


Fig. 9. SEM images and EDS analysis of plug tip after 215 pass piercing (area 1 and 2 of Fig. 8).

나 두 영역의 기지금속이 다른 소재, 즉 표면부의 기지금속이 피어싱 상대재인 빌렛소재로 판단된다. 이는 반복적인 고온 피어싱 공정 중에 Fig. 6과 같이 산화층이 박리 및 마모되어, 노출된 기지금속과 상대재인 빌렛소재와의 금속간 접촉이 발생하면서 빌렛소재가 플러그 표면으로 물질이동(Material transfer) 된 결과이다.

본 연구의 실험결과를 고찰하여 반복적인 고온 피어싱 공정에서 발생하는 플러그 최첨단부의 파손거동을 Fig. 10에 도식적으로 나타내었다. 고온 피어싱 공정 초기 산화층은 다층으로 형성되어 있으며, 약 312 μm 두께의 전체적으로 균일한 산화층이 관찰되었다. 온도상승과 변형정도가 가장 높은 플러그 최첨단부는 반복적인 고온 공정 중 산화층과 기지금속의

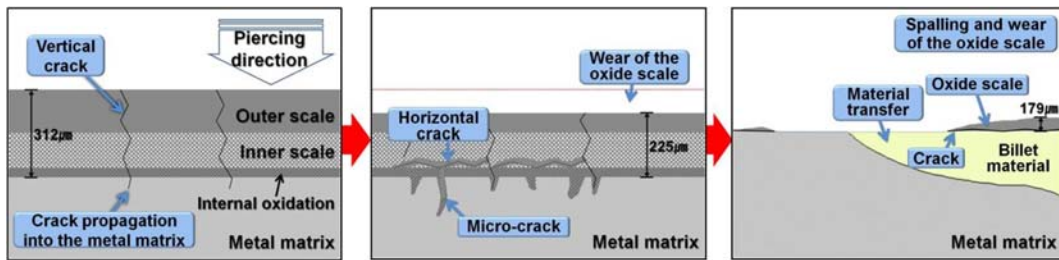


Fig. 10. Failure mechanism of piercing plug.

부피팽창 및 열팽창계수의 차이[9-11]에 의해 내부응력이 발생되었고[12], 이를 해소하기 위해 Fig. 4에 보였던 것처럼 산화층 내 수직 균열이 발생되었다 [13-16]. 이후 90회에서 마모에 의해 산화층 두께가 약 100 µm 감소되었으며, Fig. 5와 같이 산화층과 기지금속 경계영역을 따라 수평 균열이 생성되었다. 산화층 내에서 발생된 균열은 지속적인 피어싱 공정 중에 결정립계를 따라 기지금속 내부로 전파되어 거시적인 균열로 발전하며, 균열을 따라 외부 산소의 침투가 수월해져 균열내부에 추가적인 산화물이 생성되었다[17]. 또한 생성된 수평의 균열에서 기지금속 방향으로 미세균열(micro-crack)이 추가적으로 발생하여, Fig. 5(b)와 같이 내부산화가 기지금속 내부로 침투하였다. 이후 215회의 고온 피어싱 공정이 진행되며 생성된 수직 및 수평방향의 균열을 따라 산화층이 박리 및 마모되어 기지금속의 외부노출이 발생하였으며, 노출된 기지금속과 상대재인 빌렛소재와의 금속간 접촉으로 인한 빌렛소재의 플러그 표면으로의 물질이동(Material transfer)이 나타났다(Fig. 8, 9).

한편, 피어싱 공정에서는 고온 공정 중에 상대재인 빌렛 중심에서 파단(fracture)이 나타나는 만네스만 효과(Mannesmann effect)가 발생되는데[1], 이러한 파단이 발생하는 빌렛 중심에 플러그 최첨단부가 접촉하여 90회의 피어싱 공정 진행 시 날카로운 형상의 변형과 플러그 길이증가가 나타난 것으로 판단된다. 이후 본 연구에서 밝혀낸 파손거동으로 단열에 효과적인 산화층이 파손되어 고온 피어싱 공정 중 플러그 기지금속으로 전달되는 열의 상승이 야기되며[4], 이러한 기지금속으로 전달되는 열의 증가는 산화층 직하 기지금속 연화(softening)의 원인이 되어[17, 18], 높은 하중을 받는 피어싱 공정 중에 플러그 첨단부가 변형되는 결과를 가져왔다(Fig. 3).

4. 결 론

본 연구에서는 실제 심리스 튜브 피어싱 공정을 10, 90, 215회 실시한 플러그(0.19C-2.92Ni-1.34Cr-0.27Mo-0.13W강)의 최첨단부(plug tip)에서 시편을 채취하여, 피어싱 공정에 의한 플러그의 파손거동을 산화층의 변화와 연관지어 분석하였다. 외관상의 변형 양상을 3차원 형상측정기를 이용하여 관찰하였고, 최첨단부 시편의 단면을 광학현미경을 이용하여 관찰하여 그 표면산화층의 마모거동을 분석하였다. 또한, XRD로 산화층의 산화 및 마모층 변화 분석을 수행하였다.

전체적으로 균일한 산화층이 나타난 공정 초기 플러그의 산화층 내에서, 반복적인 고온 공정 중 발생된 내부응력으로 인하여 수직 균열이 발생하며, 이후 플러그 외부피막의 마모에 의한 두께감소와 함께(국부적인 외부피막 박리), 산화층/기지금속과 외부피막/내부피막 경계영역에서 수평 균열이 발생하였다. 생성된 수직 및 수평 균열을 따라 산화층이 박리 및 마모되면서 산화층 파손의 원인이 되어 기지금속의 외부노출이 발생하였다. 이러한 플러그 산화층의 파손은 금속간 접촉으로 인한 상대재인 빌렛소재에서 플러그 표면으로의 물질이동의 원인이 되며, 동시에 첨단부 변형의 원인으로 작용하였다. 따라서 향후 피어싱 플러그의 수명향상을 위한 연구에 있어 플러그 산화층의 유지가 관건이며, 피어싱 플러그의 파손거동을 산화층의 변화와 연관지어 분석한 위의 연구 결과는 기초자료로써 향후 응용 연구에 있어 다양하게 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

References

1. M. Yoshida : AIP Conf. Proc., **1252** (2010) 1333.

2. N. Morioka, H. Oka and T. Simizu : Kawasaki Steel Tech. Rep., **38** (1998) 38.
3. T. Yamakawa and K. Shimoda : US 7,383,710 B2 (2008).
4. A. Ohnuki, S. Hamazu, T. Kawanami and K. Nakajima : ISIJ., **72** (1986) 450.
5. G.E. Carr and R.H. Conde : Surf. Coat. Technol., **203** (2008) 685.
6. D. Geneve, D. Rouxel, P. Pigeat, B. Weber and M. Confente : Appl. Surf. Sci., **254** (2008) 5348.
7. R. Bhattacharya, G. Jha, S. Kundu, R. Shankar and N. Gope : Surf. Coat. Technol., **201** (2006) 526.
8. S. Liu, D. Tang, H. Wu and L. Wang : J. Mater. Process. Technol., **213** (2013) 1068.
9. S. K. Kim, C. Xu, Y. S. Hwang and D. B. Lee : Korean J. Met. Mater., **51** (2013) 849.
10. D. R. Lide(ed.) : CRC Handbook of Chemistry and Physics 84th edition, CRC Press, Section12-219 (2004).
11. B. J. Skinner : Thermal expansion in Handbook of Physical Constants, S. P. Clark, Jr.(ed.), Geol. Soc. Amer. Mem., **97** (1966) 75.
12. M. G. Fontana and N. D. Greene : Corrosion Engineering, 2nd ed., McGraw-Hill, U. S. A. (1978)
13. N. Birks, G. H. Meier and F. S. Pettit : Introduction to the high-temperature oxidation of metals, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, U. K. (2006).
14. D. B. Lee : Korean J. Met. Mater., **50** (2012) 300.
15. H. Zhu, Q. Zhu, A. K. Tieu, B. Kosasih and C. Kong : Wear, **302** (2013) 1310.
16. M. Takeda, T. Onishi, S. Nakakubo and S. Fujimoto : Mater. Trans., **50** (2009) 2242.
17. Y. Birol and D. Isler : Surf. Coat. Technol., **205** (2010) 275.
18. N. M. Vavilkin, V. S. Goncharov, D. V. Bodrov, and S. V. Lipnyagov : Steel. Transl., **39** (2009) 548.