

마찰교반프로세스를 이용한 금속재료의 표면개질

권용재

Surface Modification of Metallic Materials via Friction Stir Process

Yong-Jai Kwon

1. 서 언

마찰교반접합법(Friction Stir Welding; FSW)은 1991년에 영국의 TWI(The Welding Institute)에 의해 개발된 이래¹⁾, 알루미늄합금을 중심으로 한 금속재료의 새로운 고상접합법으로 주목을 받아, 이에 관한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다²⁻⁸⁾. Sanderson 등⁴⁾은, 이 접합법을 대부분의 알루미늄합금에 적용할 수 있는 것으로 보고하고 있다. 또한, 마찰교반접합부의 미세조직에 관한 연구에서는, 마찰교반접합 중에 고속으로 회전하는 공구에 의해 재료가 강소성가공됨으로써 접합부에서 동적 재결정이 일어나고, 그 결과 미세한 재결정립이 접합부에 형성된다고 보고되고 있다^{5,6,9)}. 이러한 마찰교반접합법의 특성을 이용하여, 이 기술을 재료의 미세조직제어에 응용한 기술이 마찰교반프로세스(Friction Stir Process; FSP)이다. 본고에서는, 이러한 마찰교반프로세스를 치밀한 금속재료 및 다공질 금속재료의 표면개질에 응용한 결과에 대하여 소개한다.

2. 치밀한 금속재료의 표면개질

2.1 원리

Fig. 1에 마찰교반프로세스를 이용한 표면개질법의 원리를 나타내었다. 마찰교반프로세스는 마찰교반접합법을 응용한 기술이기 때문에, 그 원리는 마찰교반접합법과 유사하다. 즉 마찰교반프로세스를 이용한 판재의 표면개질을 일례로 들면, Fig. 1에 나타난 것과 같이, 먼저 피가공재를 고정시켜 놓고, 고속으로 회전하고 있는 마찰교반용 공구의 Pin 부분을 피가공재의 개질하고자 하는 부분의 내부에 삽입시킨 후, 공구를 피가공재의 표면을 따라 임의의 방향으로 이동시킨다. 이때, 공구의 Pin 부분과 Shoulder 부분이 피가공재와 마찰하여 발생하는 마찰열에 의해 피가공재의 온도가 상승함으로써 가공부가 연화된다. 이와 동시에, 피가공재의 내부에 삽입되어 고속으로 회전하고 있는 Pin에 의해 연화된 피가공재가 기계적으로 교반되어 강소성변형을

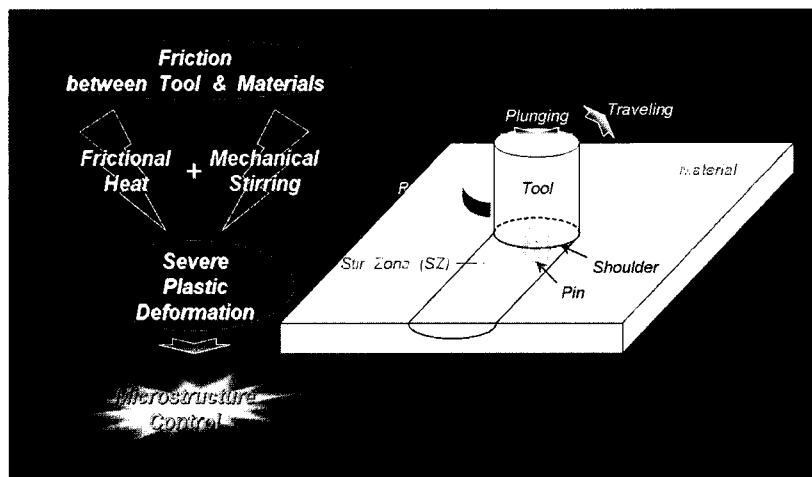


Fig. 1 Schematic illustration of surface modification via friction stir process(FSP)

일으키게 된다. 그 결과, 피가공재의 내부에서 동적 재결정이 야기됨으로써, 결정립이 미세화된다^{5,6,9)}. 이때, 표면개질층의 깊이는 핀의 길이 등을 조절함으로써 제어 가능하다.

마찰교반프로세스와 마찬가지로 재료를 강소성가공함으로써, 미세조직을 제어할 수 있는 방법으로는 ECAP (Equal-Channel Angular Pressing)¹⁰⁾, HPT (High-Pressure Torsion)¹¹⁾, ARB (Accumulative Roll Bonding)¹²⁾ 등이 주목을 받아 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다. 그러나, 이러한 방법들의 대부분은 재료의 표면 또는 일부만을 강소성가공하는 방법이 아니라, 재료 전체를 강소성가공함으로써 미세조직을 제어하는 기술이기 때문에, 재료의 표면부근만을 국부적으로 가공하여 표면부의 특성을 향상시키는 표면개질기술로서 적용하기는 어려운 실정이다. 이에 반하여, 마찰교반프로세스는, 전술한 바와 같이, 금속재료의 표면부근만을 국부적으로 강소성가공함으로써 개질할 수 있다는 특성을 가지고 있다.

2.2 알루미늄합금의 표면개질

본 장에서는, 공업용 순 알루미늄 1050의 냉간압연재(두께 5mm)에 마찰교반프로세스를 적용하여 표면을 개질한 결과에 대하여 소개한다.

2.2.1 미세조직

Fig. 2¹³⁾에 표면부를 마찰교반프로세스를 이용하여 가공한 후의 마찰교반부(SZ) 부근의 광학조직을 나타내었다. 미가공부(UZ)에서는, 압연방향(RD)으로 결정립이 조대하게 연신된 전형적인 압연조직을 관찰할 수 있다. 그러나, 표면부근의 마찰교반부에서는 고속으로 회전하는 Pin에 의해 재료가 강소성가공됨으로써, 압연

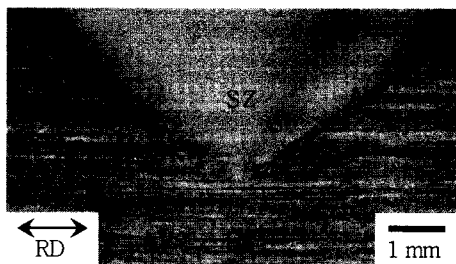


Fig. 2 Typical optical macrostructure of a cross-section perpendicular to a tool traverse direction of cold-rolled and friction-stir-processed 1050 aluminum alloy. Unprocessed zone, friction stir processed zone, retreating side and advancing side are labeled UZ, SZ, RS and AS, respectively¹³⁾

조직은 사라지고 새로운 미세조직이 형성되어 있다는 것을 알 수 있다. Kwon 등¹³⁾은, 공구의 이동속도가 155 mm/min으로 일정할 경우에 있어서, 공구의 회전속도가 감소함에 따라 마찰교반부의 결정립경 또한 감소하여 공구의 회전속도가 560 rpm인 경우에 있어서는 1회의 가공만으로도 결정립경을 서브 마이크론까지 미세화할 수 있었다고 보고하였다. 일반적으로, ECAP 나 ARB 프로세스를 이용하여 결정립을 서브 마이크론까지 미세화시키기 위해서는 수회 이상의 반복적인 가공을 필요로 한다는 것을 고려하면, 마찰교반프로세스는 금속재료의 표면개질에 대단히 효과적이라고 할 수 있다.

2.2.2 경도분포

Fig. 3¹³⁾에 마찰교반프로세스를 이용하여 표면부를 가공한 후 마찰교반부 부근의 경도분포를 조사한 결과를 나타내었다. 이 때, 공구의 이동속도 및 회전속도는 각각 155 mm/min 및 560 rpm으로 하였다. 마찰교반부는 미가공부보다 약 40%나 높은 경도값을 나타내었다. 이러한 결과는, 전술한 바와 같이, 마찰교반프로세스에 의해 마찰교반부의 결정립경이 미세화되었기 때문인 것으로 사료된다. 마찰교반부 내에서는, AS (Advancing Side; 공구의 회전방향과 공구의 이동방향이 동일한 쪽)가 RS(Retreating Side; 공구의 회전방향과 공구의 이동방향이 반대로 되는 쪽)보다 높은 경도값을 나타내었다. 또한, 마찰교반부와 미가공부 사이의 경도변화에 있어서도 RS에서보다 AS에서 경도값이 급격하게 변화하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터, 마찰교반부에 있어서의 경도분포는 공구의 회전축을 중심으로 좌우에서 비대칭성을 나타냄을 알 수 있

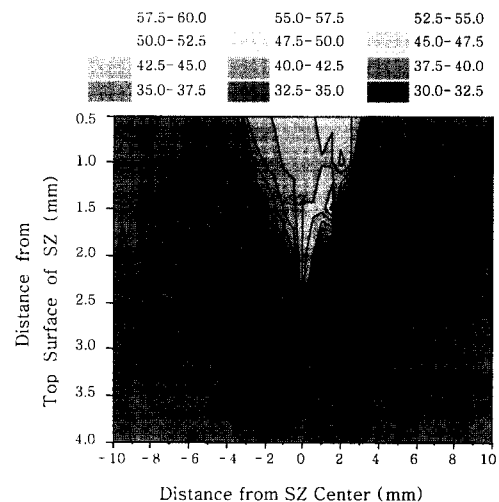


Fig. 3 Typical Vickers microhardness distribution on a cross-section perpendicular to a tool traverse direction of cold-rolled and friction-stir-processed 1050 aluminum alloy¹³⁾

다. Kwon 등¹³⁾은, 마찰교반부 내에서의 이러한 정도 값의 불균일성은 공구의 회전속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내는 것으로 보고하고 있다.

3. 다공질 금속재료의 표면개질

발포 알루미늄합금을 대표로 하는 다공질 금속재료는, 다량의 기공을 포함하고 있는 셀구조를 형성하고 있다. 이러한 독특한 구조로 인하여, 치밀한 금속재료와 비교하여 경량성, 충격흡수성, 흡음성, 단열성 등이 매우 우수하기 때문에, 자동차, 의료, 건축, 토목 등과 같은 다양한 산업분야에서 주목을 받아 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁴⁻²⁰⁾. 최근, 이러한 다공질 금속재료의 표면개질방법으로 마찰교반프로세스를 응용한 기술이 개발되었다²¹⁾. 본 장에서는 마찰교반프로세스를 응용한 다공질 금속재료의 표면개질기술에 대하여 소개한다.

3.1 원리

Fig. 4²¹⁾에 마찰교반프로세스를 응용한 다공질 금속재료의 표면개질법의 원리를 나타내었다. 이 표면개질법 역시 마찰교반프로세스와 마찬가지로 마찰교반접합법을 응용한 기술이기 때문에, 그 원리는 마찰교반접합법과 유사하다. 먼저, 피가공재인 다공질 금속재료를 고정시켜 놓고, 원주형의 비소모성 공구를 고속으로 회전시키면서, 다공질 금속재료의 표면으로부터 임의의 깊이까지 삽입한 후, 공구를 다공질 금속재료의 표면을 따라 이동시킨다. 이 때, 고속으로 회전하고 있는 공구와 다공질 금속재료 사이의 마찰현상에 의해 마찰열이 발생하고, 이 마찰열에 의해 다공질 금속재료의 온도가 상승하여 연화된다. 이와 동시에, 연화된 다공질 금속재료의 표면층에서는 고속으로 회전하는 공구에 의해 소성변형이 유기된다. 이러한 결과로서, 다공질 금속재

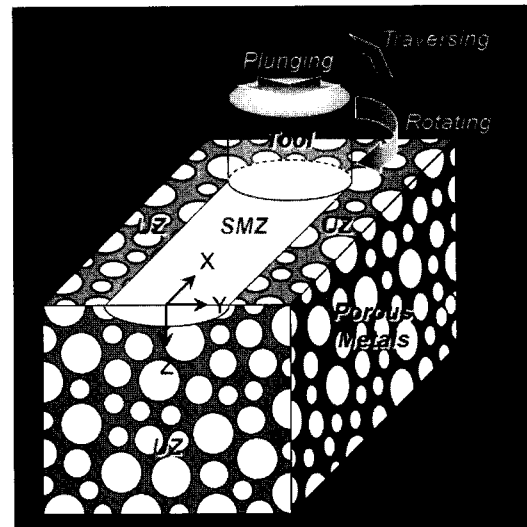


Fig. 4 Schematic illustration of surface modification of porous metals. The surface-modified zone and the unprocessed zone are labeled SMZ and UZ, respectively. And then, X, Z, and Y represent the tool traverse direction, the tool rotation axis direction, and the width direction of the porous metals, respectively²¹⁾

료의 표면부근의 셀구조가 국부적으로 파괴되고 표면부근에서 치밀화가 이루어짐으로써, 다공질 금속재료의 표면에 다공질이 아닌 새로운 치밀한 표면층이 형성된다.

3.2 발포 알루미늄합금의 표면개질

본 장에서는, 마찰교반프로세스를 응용하여 발포 알루미늄합금의 표면부를 개질한 결과를 일례로서 소개한다.

3.2.1 표면형상

Fig. 5²¹⁾에 공구의 이동속도를 150 mm/min으로 일정하게 유지하고, 공구의 회전속도를 (a) 820, (b)

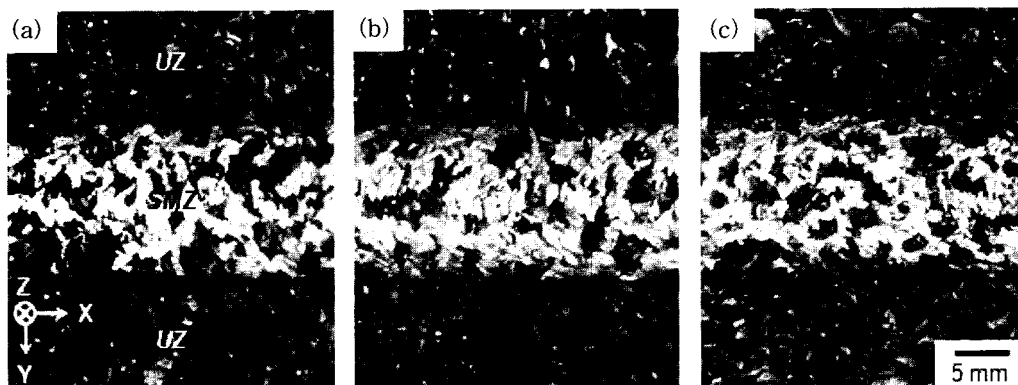


Fig. 5 Surface appearances of the porous metals friction-surface-modified at the tool rotation speeds of (a) 820, (b) 1390, and (c) 2400 rpm under the constant tool traverse speed of 150 mm/min²¹⁾

1390 및 (c) 2400 rpm으로 변화시켜, 발포 알루미늄 합금의 표면을 가공한 후 표면의 형상을 관찰한 결과를 나타내었다. 미가공부(UZ)에서는 다량의 기공을 포함하고 있는 발포 알루미늄합금의 셀구조가 관찰된다. 그러나, 표면개질부(SMZ)에서는 기공이 일부 잔존하고 있지만 미가공부와는 달리, 공구의 모든 회전속도에서 명확한 셀구조는 관찰되지 않고, 미가공부보다 평탄한 새로운 구조의 표면층이 형성되었다는 것을 알 수 있다. 특히, 1390 rpm에서는 가장 기공이 적고 평탄한 표면개질부가 얻어졌다. 이러한 결과로부터, 본 프로세스에 있어서 공구의 회전속도는 표면개질부의 형상에 영향을 미치는 중요한 인자임을 알 수 있다.

3.2.2 기계적 특성

Fig. 6²¹⁾에 공구의 이동속도를 150 mm/min으로 일정하게 유지하고, 공구의 회전속도를 820, 1390 및 2400 rpm으로 변화시켜 표면을 개질한 발포 알루미늄 합금에 있어서 표면개질부의 기계적 특성을 조사하기 위하여, 강구를 이용하여 최대압입강도를 측정된 결과를 나타내었다. 공구의 모든 회전속도에 있어서, 표면개질부의 최대압입강도가 미가공부보다 증가하였다는 것을 알 수 있다. 특히, Fig. 5에 나타낸 것과 같이, 가장 기공이 적고 평탄한 표면개질부가 얻어진 1390 rpm에서 미가공부보다 약 2배 정도 높은 최대압입강도를 나타내었다. 이러한 결과로부터, 본 프로세스에 있어서 공구의 회전속도는 다공질 금속재료의 표면개질부의 형상뿐만 아니라, 기계적 특성에도 영향을 미치는 중요한 인자임을 알 수 있다.

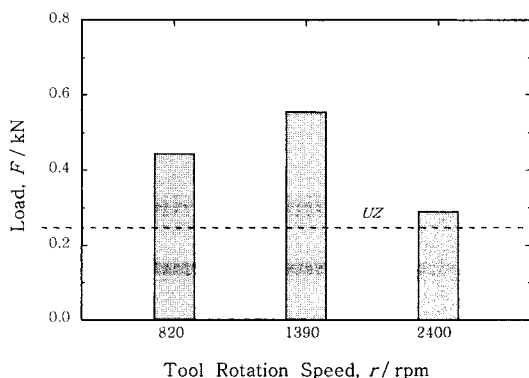


Fig. 6 Influence of the tool rotation speed on the maximum indentation load in the surface-modified zone of the porous metals. The broken line shows the maximum indentation load in the unprocessed zone²¹⁾

4. 결 론

본고에서는, 금속재료의 새로운 표면개질기술로서 주목을 받아 연구 및 개발이 활발하게 진행되고 있는 마찰교반프로세스를 치밀한 알루미늄합금 압연재 및 다공질 알루미늄합금의 표면개질에 적용한 예를 중심으로, 그 원리와 특성 등에 대하여 소개하였다. 마찰교반프로세스를 이용하면, 수회 이상의 반복적인 가공을 필요로 하는 ECAP나 ARB와는 달리 1회의 가공만으로도 금속재료의 결정립경을 서브 마이크론까지 미세화할 수 있을 뿐만 아니라, 다공질 금속재료의 표면을 치밀화함으로써, 금속재료의 기계적 특성을 향상시킬 수 있다. ECAP나 ARB는 재료 전체를 가공함으로써 미세조직을 제어하는 기술인 반면에, 마찰교반프로세스를 이용하면 재료의 국부적인 부분, 특히 표면부에 대한 미세조직의 제어가 가능하다는 등의 다양한 특성을 보유하고 있기 때문에, 향후 다양한 산업분야에서 그 응용이 확대될 중요한 표면개질기술 중의 하나로서 발전해 나갈 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Templesmith and C. J. Dawes: GB Patent Application No. 9125978.8, Dec. 1991, US Patent No. 5460317, Oct. 1995
2. W. M. Thomas and E. D. Nicholas: *Materials & Design* **18**(1997), 269-273
3. C. J. Dawes and W. M. Thomas: *Weld. J.* **75** (1996), 41-45
4. A. Sanderson, C. S. Punshon and J. D. Russell: *Fusion Engineering and Design* **49-50**(2000), 77-87
5. C. G. Rhodes, M. W. Mahoney, W. H. Bingel, R. A. Spurling and C. C. Bampton: *Scr. Mater.* **36** (1997), 69-75
6. G. Liu, L. E. Murr, C. S. Niou, J. C. McClure and F. R. Vega: *Scr. Mater.* **37**(1997), 355-361
7. Y. Li, L. E. Murr and J. C. McClure: *Mater. Sci. Eng. A* **271**(1999), 213-223
8. O. V. Flores, C. Kennedy, L. E. Murr, D. Brown, S. Pappu, B.M. Nowak and J. C. McClure: *Scr. Mater.* **38**(1998), 703-708
9. L. E. Murr, G. Liu and J. C. McClure: *J. Mater. Sci. Lett.* **16**(1997), 1801-1803
10. P. B. Berbon, S. Komura, A. Utsunomiya, Z. Horita, M. Furukawa, M. Nemoto and T. G. Langdon: *Mater. Trans. JIM* **40**(1999), 772 - 778
11. N. Tsuji, K. Shiotsuki and Y. Saito: *Mater. Trans. JIM* **40**(1999), 765 - 771
12. I. V. Alexandrov, Y. T. Zhu, T. C. Lowe, R. K. Islamgaliev and R. Z. Valiev: *Nanostruct. Mater.* **10**(1998), 45 - 54

13. Y. J. Kwon, I. Shigematsu and N. Saito: J. JAPAN Inst. METALS **66**(2002), 1325-1332 (in Japanese)
14. L. J. Gibson and M. F. Ashby: Cellular Solids: Structures and Properties(2nd Edition), Cambridge University Press, 1997
15. M. Ashby, N. Fleck, H. Wadley, J. Hutchinson and L. Gibson: Metal Foams: A Design Guide, Butterworh-Heinemann, 2000
16. J. Banhart: Prog. Mater. Sci. 46(2001), 559 - 632
17. F. Yi, Z. Zhu, F. Zu, S. Hu and P. Yi: Mater. Charact. **47**(2001), 417 - 422
18. C. M. Moran, J. A. Ross, C. Cunningham, M. Butler, T. Anderson, D. Newby, K. A. A. Fox and W. N. McDicken: Ultrasound Med. Biol. **32**(2006), 421 - 428
19. Z. Xie, T. Ikeda, Y. Okuda and H. Nakajima: Mater. Sci. Eng. A **386**(2004), 390 - 395
20. W. Jiejun, L. Chenggong, W. Dianbin and G. Manchang: Comp. Sci. Technol. 63(2003), 569 - 574
21. Y. J. Kwon, I. Shigematsu and N. Saito: Mater. Lett. **62**(2008), 4458-4460



- 권용재
- 1968년생
- 울산대학교 첨단소재공학부
- 비철경량금속재료, 마찰교반접합
- e-mail : yongjaikwon@mail.ulsan.ac.kr