[논문] 열처리공학회지, 제37권 제3호(2024)
J. of the Korean Society for Heat Treatment.
https://doi.org/10.12656/jksht.2024.37.3.114

자연 시효 처리된 AA 2026의 고온 노출에 따른 물성 열화 특성에 대한 연구

김하늘 · 강현우 · 장병록 · 김희국[1,†]
인하대학교 제조혁신전문대학원 첨단소재공정공학과

Deterioration Characteristics of Naturally Aged AA 2026 due to ExpoSure to High Temperatures

HaNeul Kim, HyeonWoo Kang, ByoungLok Jang, HeeKook Kim[1,†]
Department of Materials Processing and Engineering, Inha Manufacturing Innovation School, Incheon 21999, Republic of Korea

Abstract: AA 2026, which is used as an aviation material, is an improved version of 2024 and has higher physical properties, and is a material that has the potential to be applied to supersonic aircraft to be developed in the future. However, when an aircraft exceeds supersonic speeds, the surface heats up and the material must be resistant to this. Therefore, this study confirmed the high-temperature properties of AA 2026, an aviation structural material. AA 2026, solution treated at 500℃ for 4hr, was naturally aged at room temperature for more than 168 hr. Changes in microstructure and physical properties were confirmed over several hours of exposure to 100℃, 200℃, and 300℃, respectively. As a result of microstructure analysis, there was no significant change at 100℃, and from 200℃, GPB, a strengthening mechanism, grew and formed an S Phase. It was confirmed that the S Phase grew as the exposure time increased. Through a tensile test, it was confirmed that physical properties deteriorated as the precipitates grew. However, it was confirmed that the properties were stably maintained at 100℃, which is the temperature when the speed of a supersonic aircraft is less than Mach 2.

(Received April 2, 2024; Received May 13, 2024; Accepted May 14, 2024)

Key Words *: Deterioration, Aircraft material, Microstructure, Precipitates, High temperature*

1. 서 론

알루미늄 합금은 철강 소재에 비해 가벼움에도 다양한 강화 기구를 통해 높은 물성을 확보할 수 있다. 이러한 특성으로 인해 경량화가 요구되는 다양한 분야에서 철강 대신 구조재로 사용되기에 적합하다. 특히 2xxx계 합금은 시효 처리를 통해 높은 강도를 얻을 수 있으므로 항공용 구조재로 사용되고 있다. 이 중 AA 2024는 Al에 Cu, Mg등의 합금 원소를 첨가한 석출 강화형 합금이다. AA 2024는 Cu와 Mg의 비율에 따라 강화에 기여하는 석출상이 달라진다. Y. Zheng, et al.의 연구에 의하면 Al-Si-Cu-Mg합금에서 Cu/Mg의 비율에 따라 금속내 석출상이 달라진다[1]. J.L. García-Hernández, et al.은 AA2024에서 Cu/Mg의 비율이 8이상일 경우 θ Phase(Al_2Cu)가 주로 생성되고, 비율 이 4에서 8사이일 경우 θ Phase와 S Phase(Al_2CuMg)가 혼재하고 1.5~4일 경우에는 S Phase가 주로 생성되어 물성에 기여한다고 언급하였다[2].

AA 2026은 AA 2024에서 불순물 원소인 Fe나 Si를 줄이고 Zr을 첨가한 합금이다. 기존 AA 2024에 비해 인성이나 강도, 피로 특성에서 더 나은 성능을 가지며, Zr의 첨가로 인해 압출 공정이나 열간 가공 시 발생하는 조대한 재결정층의 형성을 억제하여 보다 균일한 소재 특성을 확보할 수 있다.

항공용 알루미늄 구조재는 높은 물성이 필수적이

† Corresponding author. E-mail hkkim1058@inha.ac.kr
Copyright ⓒ The Korean Society for Heat Treatment

다. 항공용 구조재는 기체의 무게를 견디고 비행시 발생하는 진동, 기후 환경 등 다양한 요인들에 대한 저항성을 가져야 한다. 이를 위해 합금 조성의 제어나 공정 방법에 따른 물성 향상 방법에 대한 연구가 진행되어왔다[3-8]. H.W. Kang,et al.은 AA 2026 합금의 고온 가공시 변형 속도가 재결정 경향을 결정하며, 이로 인해 미세 조직에 차이가 발생할 수 있다고 주장하였다[9]. Y.F. Song, et al.은 Al-Cu-Mg 합금의 2단계 시효를 통해 치수 안정성을 향상시키는 방법을 제안하였다[10]. 해당 연구에서 시효 시간이 증가함에 따라 물성이 강화 및 열화 되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 시효 과정에서 석출물의 형성 및 에너지의 해소 등 다양한 안정화 메커니즘이 진행되며, 이로 인해 치수 안정성이 향상되었다. 석출 강화형 합금은 석출상의 분포나 형태에 의해 물성이 크게 달라지기 때문에 시효 조건을 통한 석출상의 제어에 대한 연구도 많이 진행되었다[11-16].

항공용 소재의 고온 노출에 따른 물성 변화는 향후 개발될 초음속 항공기에서 더욱 중요하다. 과거 콩코드 초음속 여객기의 데이터를 살펴보면 기체의 속도가 음속을 돌파하는 시점에서부터 표면 온도가 높아지며 마하 2도달 시 100℃, 마하 2.4도달 시 160℃까지도 가열되는 것으로 알려져 있다[17]. J.H. Cha, et al.에 의하면 항공기의 형태에 따라 표면 온도가 달라지며, 마하 1.9에서 약 97℃에 도달한다고 언급하였다[18]. 초음속 항공기는 온도나 비용 등의 문제로 콩코드 이후 개발되지 않았기 때문에, 군사용을 비롯한 특수 기체에 사용되는 부분에 한해서는 비용을 고려하지 않는 소재를 사용할 수 있었다. 그러나 최근 다시 초음속 여객기의 개발이 시작되는 만큼 이에 대응할 수 있는 상용 소재에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 향후 개발될 항공용 소재에 요구될 수 있는 고온 열화 특성에 대해 확인하였다. 자연 시효 처리된 AA 2026 항공용 압출재를 고온에 노출시킴으로써 노출 시간에 따른 미세 조직적, 기계적 물성의 변화를 확인하였다. 이를 기반으로 AA 2026의 고온 안정성에 대한 평가를 진행하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 사용 재료 및 실험 방법

본 연구에 사용된 소재는 동양에이케이코리아에서 제공한 AA 2026압출재로 합금 조성은 표 1과 같다. 용체화 열처리는 500℃에서 4hr동안 진행하였다. 이후 상온에서 168hr이상 자연 시효 처리를 진행하였다. 시효 처리가 완료된 시편은 100℃, 200℃, 300℃에서 각각 1hr, 10hr, 100hr동안 노출시켰다.

고온 노출된 소재의 미세 조직 변화를 확인하기 위해서투과 전자 현미경(Transmission Electron Microscope, JEM-F200)을 통한 미세 조직 분석을 진행하였다. 시편은 제트폴리싱을 통해 제작되었으며, 미세 석출물의 성분 분석을 위해 EDS(Aztec X-Max)를 통한 분석을 진행하였다. 또한 고온 노출로 인한 물성의 변화를 확인하기 위해서 만능재료시험기(AGS-X)를 통해 5mm/min의 속도로 인장시험을 진행하였다. 인장 시편은 ASTM E8/E8M의 Subsize Specimen 규격을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

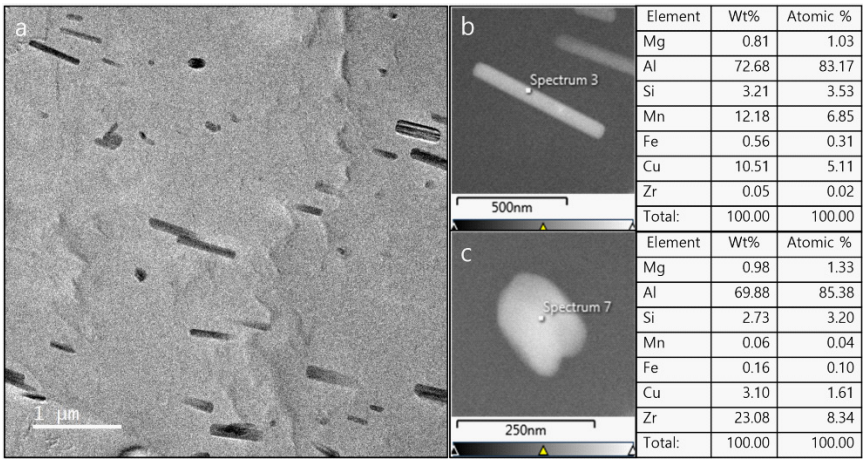
3.1 자연 시효 처리한 AA 2026의 미세 조직

그림1은 자연 시효가 완료된 AA 2026의 미세 조직이다. 결정립 내부에서는 용체화 처리시 Ostwald ripening에 의해 조대화되어 잔류한 석출물이 확인되었다(그림 1b). 이러한 석출물은 대부분 Si나 Mn을 포함하고 있는 것으로 확인되었다. 이러한 석출물은 약 550℃ 이상에서 용해되는 것으로 알려져 있다[19]. 따라서 용체화 처리 온도인 500℃에서는 잔류하며, 더욱 성장하는 것으로 보인다. 또한 재결정을 방해하는 것으로 알려진 Al-Zr석출물 등이 확인되었다(그림 1c).

고배율의 이미지에서는 Al매트릭스와 다른 격자

Table 1. Composition table of domestically produced AA 2026 used in the study

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zr	etc
Bal (wt%)	0.05	0.07	3.8~4.1	0.4~0.6	1.1~1.4	0.1	0.03



Element	Wt%	Atomic %
Mg	0.81	1.03
Al	72.68	83.17
Si	3.21	3.53
Mn	12.18	6.85
Fe	0.56	0.31
Cu	10.51	5.11
Zr	0.05	0.02
Total:	100.00	100.00

Element	Wt%	Atomic %
Mg	0.98	1.33
Al	69.88	85.38
Si	2.73	3.20
Mn	0.06	0.04
Fe	0.16	0.10
Cu	3.10	1.61
Zr	23.08	8.34
Total:	100.00	100.00

Fig. 1. Microstructure image of naturally aged AA 2026: a) Inside the grain, b) Coarse precipitate, c) Al-Zr precipitate.

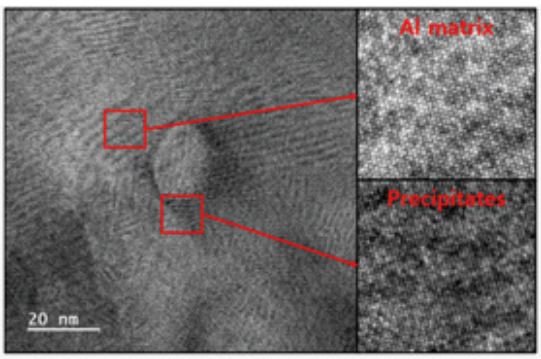


Fig. 2. Aluminum matrix and strengthening mechanism observed in naturally aged AA 2026.

를 가지는 영역이 관찰된다(그림 2). 연구에 사용된 AA 2026은 Cu와 Mg의 비율이 약 2.8정도로 θ Phase보다 S Phase의 석출이 우세하다고 볼 수 있다. 따라서 용체화 처리를 통해 과포화 고용체가 된 AA 2026에서는 시효 처리동안 합금 원소가 석출 구동력에 의해 준석출상인 GPB~S'를 형성한다[2, 20, 21]. 이러한 준석출상은 Al매트릭스의 격자를 변형시킴으로써 전위의 이동을 방해하여 소재의 강도를 향상시킨다. 그러나 이러한 준석출상이 성장하여 Al과 다른 격자를 형성하는 석출물이 되면 격자의 변형장이 감소하여 강화 효과가 감소하는 것으로 알려져 있다[22].

3.2 고온 노출에 따른 AA 2026-T4의 미세 조직 변화

자연 시효 처리가 완료된 AA 2026를 각각 100℃, 200℃, 300℃에 1hr, 10hr, 100hr동안 노출시킨 후 미세 조직의 변화를 확인하였다(그림 3). 200℃ 이상의 온도에 노출된 소재에서는 바늘 형태의 석출물이 관찰되었다. SAED 패턴과 EDS 성분 분석을 통해 해당 석출물이 Al-Cu-Mg를 주성분으로 하는 S Phase 석출물이라는 것을 확인하였다(그림 4)[23]. S Phase는 일반적으로 AA 2026 합금에서 물성 강화에 기여한다고 알려져 있는 석출물이다[2, 20, 21, 22].

그림 3a-c는 100℃에 노출된 소재의 미세 조직이다. 100℃에 노출된 소재의 미세 조직에서는 노출 시간에 따른 변화를 확인하기 어려웠다.

200℃에 노출된 소재의 미세 조직에서는 유의미한 변화가 관찰되었다(그림 3d-f). 1hr 노출된 시점에서 결정립 내부에 매우 미세한 바늘상의 S Phase가 생성되었다. S Phase는 같은 방향을 향하는 석출물끼리 군집을 이루며 분포하였고, 석출물 군집 간에 거리를 두고 형성되었다. 10hr 노출된 소재에서는 바늘 형태의 S Phase가 더욱 성장하여 군집간 거리가 가까워졌으며, 결정립 내부에 고루 분포하게 되었다. 100hr 노출되었을 때는 바늘 형태의 석출물이 더 성장하여 rod 형태에 가깝게 변하였다.

300℃에 노출된 소재의 미세 조직에서는 더욱 급격한 변화가 관찰되었다(그림 3g-i). 1hr 노출되었을 때부터 S Phase가 결정립 내부에 고루 분포하였으며 크기 또한 200℃에서 10hr 노출되었을 때보다 길고 두꺼웠다. 10hr 노출된 조직에서는 부분적으로 재결정

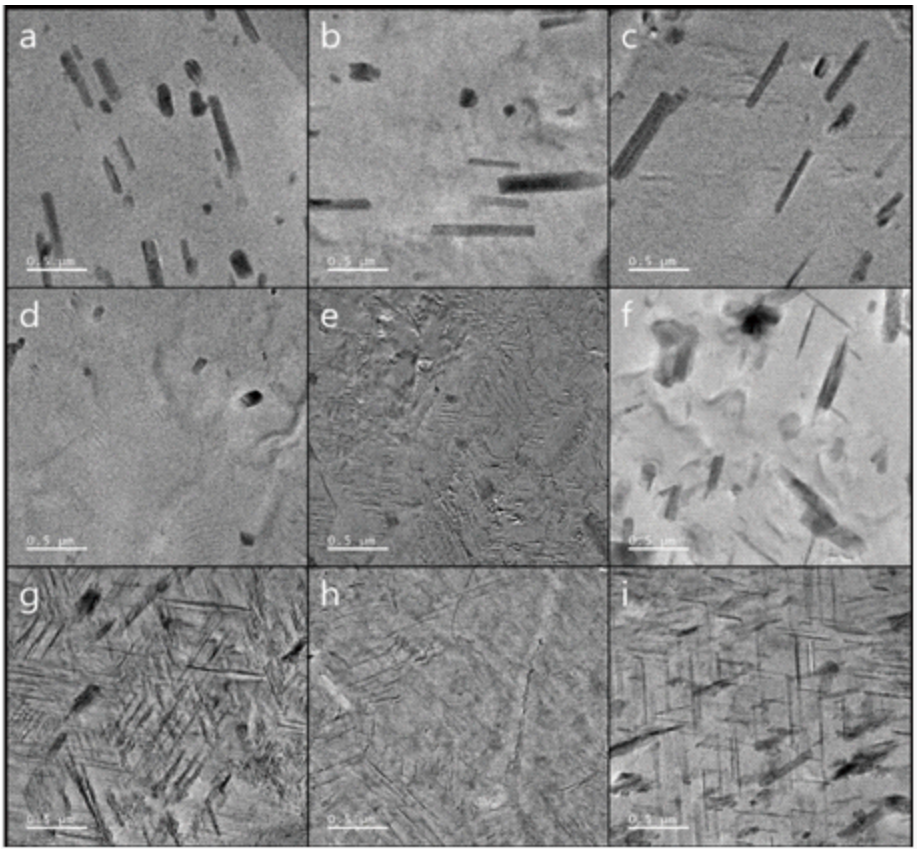


Fig. 3. Microstructural changes in AA 2026-T4 due to high temperature exposure: (a-c) Exposure to 100℃ for 1hr, 10hr, and 100hr in that order, (d-f) Exposure to 200℃ for 1hr, 10hr, and 100hr in that order, (g-i) Exposure to 300℃ for 1hr, 10hr, and 100hr in that order.

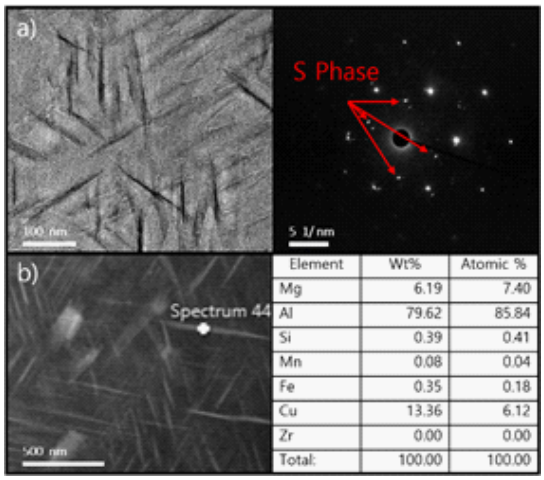
으로 인한 미세 결정립이 관찰되었다. 100hr 노출된 미세 조직에서는 rod 형태로 성장한 석출물이 결정립 내부에 고루 분포하게 되었다. 고온에 노출되며 확산 속도가 빨라졌기 때문에 석출물의 생성 및 성장이 가속되었다는 것을 확인하였다.

3.3 고온 노출에 따른 AA 2026-T4의 기계적 특성 변화

인장시험을 통해 고온 노출이 AA 2026의 물성에 미친 영향에 대해 확인하였다(그림 5). 100℃에 노출된 시편의 경우 미세 조직의 변화와 마찬가지로 인장시험 결과에서도 유의미한 변화를 확인할 수 없었다(그림 5a, d). 1hr 노출된 시편에서 연신율의 감소가 관찰되었지만 노출 시간의 증가에 따른 물성의 변화가 거의 없었다. 자연 시효시의 항복 강도는 341MPa였으며 100℃에서 1hr, 10hr, 100hr 노출 시 각각 350MPa, 329MPa, 341MPa로 유지되었다. 최대와 최소의 차이가 약 20MPa정도로 나타났으며 인장 강도나 연신율에서도 차이가 매우 적었다. 따라서 AA 2026은 100℃에서도 안정적으로 물성을 유지할 수 있는 것으로 볼 수 있다.

200℃에 노출된 소재에서는 물성의 열화와 일시적인 강화가 확인되었다(그림 5b, e). 1hr 노출된 소재는 항복 강도가 307MPa로 감소함과 동시에 연신율이 19.69%에서 22.41%로 증가하였다. 이는 일반적인 소재의 열화와 같은 경향으로 볼 수 있다. 이를 통해 미세 조직상에서 발견된 S Phase가 물성 강화에 기여하지 못했음을 알 수 있다. 10hr 노출된 항복 강도는 다시 330MPa까지 증가하였으나 연신율이 11.80%로 크게 감소하였다. 이는 앞서 확인한 소재의 물성 강화

기구가 GPB zone(그림 2)에서 S Phase(그림 3e)로 전환되었음을 의미한다. 또한 1hr과 달리 물성이 강화되었음을 통해 바늘 형태의 석출물이 물성을 강화시키기 위해서는 일정 수준 이상의 크기 및 분율을 확보해야 함을 알 수 있다. 100hr까지 노출되었을 때는 강도가 262MPa까지 감소하고 연신율은 12.63%로 소폭 증가하였다. 미세 조직 상에서 석출물의 성장에 따라 물성이 감소하는 것을 확인하였으므로 100hr 이상 노출 시 계속해서 물성의 열화가 발생할 것임을 알 수 있다.



Element	Wt%	Atomic %
Mg	6.19	7.40
Al	79.62	85.84
Si	0.39	0.41
Mn	0.08	0.04
Fe	0.35	0.18
Cu	13.36	6.12
Zr	0.00	0.00
Total:	100.00	100.00

Fig. 4. (a) SAED pattern and (b) EDS results of needle-shaped precipitates appearing in a material exposed to 300℃ for 1 hr.

300℃에 노출된 소재는 노출 시간에 따라 급격한 물성의 열화가 발생하였다(그림 5c, f). 노출 시간에 따라 항복 강도는 255MPa, 164MPa, 104MPa로 감소하였으며, 연신율은 9.22%로 감소 후 13.47%, 17.39%로 증가하였다. 항복 강도의 감소는 미세 조직 상에서 석출물의 성장으로부터 기인하였으며, 연신율의 회복은 부분적으로 확인되었던 재결정과 함께 석출물의 생성으로 인한 고용 강화 효과의 상실 및 석출 강화 효과의 저하로부터 기인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 자연 시효 처리된 항공용 AA 2026 압출재가 고온에 노출되었을 때의 물성 변화와 원인 분석을 위해 미세 조직 분석 및 인장 시험을 진행하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

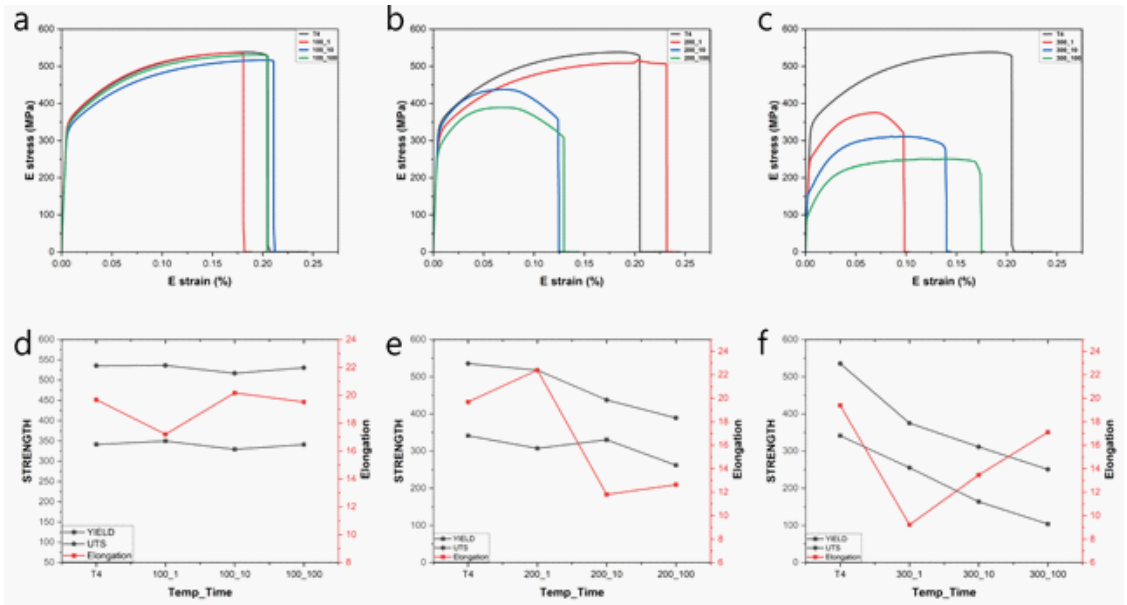


Fig. 5. (a-c) Results of tensile test and (d-f) Changes in mechanicalproperties of AA 2026-T4 exposed to high temperature: (a,d) exposed to 100℃, (b,e) exposed to 200℃, (c,f) exposed to 300℃.

(1) 자연시효 처리된 AA 2026에서는 다양한 석출물이 존재하며, 이 중 Al Matrix의 격자에 존재하는 GPB zone에 의한 물성 강화 효과가 가장 크다.

(2) 100℃에 노출된 AA 2026-T4의 미세 조직에서는 유의미한 변화를 확인할 수 없었다. 또한 인장시험 결과에서도 항복강도의 변화가 20MPa 수준으로 적고, 시간이 지남에 따라 안정되었다. 따라서 100℃는 AA 2026을 사용하기에 안정적인 온도라고 판단할 수 있다.

(3) 200℃에 노출된 AA 2026-T4의 미세 조직에서는 시간에 따른 GPB의 성장을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 변화가 인장 시험 결과에도 영향을 미친 것을 확인하였다. GPB가 성장하여 미세한 S Phase를 형성하였을 때는 강화 효과가 감소하였으며 S Phase의 성장에 따라 다시 물성이 강화되었다. 그러나 고온 노출이 지속되면 S Phase가 과도하게 성장하며 물성이 열화 되었다. 따라서 200℃에서는 AA 2026의 금속적 변화가 진행되기 때문에 장시간 사용이 불가능함을 알 수 있다.

(4) 300℃에 노출된 AA 2026-T4는 매우 급격한 열화가 확인되었다. 이는 빠른 확산속도에 의한 S Phase의 과성장이 원인이었다. 따라서 AA 2026은 300℃ 이상에서는 사용이 불가능하다.

(5) 초음속 항공기의 속도가 마하 2 미만인 경우 표면 온도가 100℃를 넘지 않으며, AA 2026은 표면이 아닌 구조재로 사용되기 때문에 향후 개발될 초음속 항공기의 스펙에 따라 구조재로 사용될 가능성이 있음을 확인하였다.

5. 감사의 글

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (20017370)

REFERENCES

1. Zheng, Yan., et al. “Effects of Cu content and Cu/Mg ratio on the microstructure and mechanical properties of Al–Si–Cu–Mg alloys.” J. All. Comp., **649** (2015): 291-296.

2. García-Hern-ndez, J. L., et al. “Influence of plastic deformation and Cu/Mg ratio on the strengthening mechanisms and precipitation behavior of AA2024 aluminum alloys.” J. Mater. Res. Tech., **8.6** (2019): 5471-5475.

3. Ebrahimi, G. R., and H. R. Ezatpour. “Effect of precipitation on the warm deformation behavior of AA2024 alloy.” Mater. Sci. Eng. A, **681** (2017): 10-17.

4.Can, L. I. U., Hui Zhang, and Fu-lin Jiang. “Characterization of dynamic microstructure evolution during hot deformation of Al–4.10 Cu–1.42 Mg–0.57 Mn–0.12 Zr alloy.” Trans. Nonfer. Met. Soc. Chi., **24.11** (2014): 3477-3485.

5.Huang, Xudong., et al. “Hot deformation behavior of 2026 aluminum alloy during compression at elevated temperature.” Mater. Sci. Eng. A, **527.3** (2010): 485-490.

6. Roven, Hans J., Manping Liu, and Jens C. Werenskiold. “Dynamic precipitation during severe plastic deformation of an Al–Mg–Si aluminium alloy.” Mater. Sci. Eng. A, **483** (2008): 54-58.

7.Mao, J., S. B. Kang, and J. O. Park. “Grain refinement, thermal stability and tensile properties of 2024 aluminum alloy after equal-channel angular pressing.” J. Mater. Proc. Tech., **159.3** (2005): 314-320.

8.Zhan, Xuepeng., et al. “Dynamic recrystallization and solute precipitation during friction stir assisted incremental forming of AA2024 sheet.” Mater. Char., **174** (2021): 111046.

9. Kang, HyeonWoo., et al. “High Temperature Deformation and Microstructural Evolution of Homogenized AA 2026 Alloy.” Kor. J. Met. Mater., **61.5** (2023): 338-346.

10.Song, Y. F., et al. “Effects of two-stage aging on the dimensional stability of Al-Cu-Mg alloy.” J. All. Comp., **701** (2017): 508-514.

11.Ning, Ai-Lin., Zhi-Yi Liu., and Su-Min Zeng. “Effect of large cold deformation on characteristics of age-strengthening of 2024 aluminum alloys.” Trans. Nonfer. Met. Soc. Chi., **16.5** (2006): 1121-1128.

12.Pakravan, K., A. Hosseini Monazzah, and S. Farahmand. “Ageing condition of tensile specimens: fracture behavior of notched Al2024 sheet under tensile loading.” Mater. Res. Exp., **7.5** (2020): 056522.

13.Nourbakhsh, Said, and J. Nutting. “The high strain deformation of an aluminium-4% copper alloy in the supersaturated and aged conditions.” Acta Metal., **28.3** (1980): 357-365.

14.Zhao, Y. L., et al. “Double-peak age strengthening of cold-worked 2024 aluminum alloy.” Acta Mater., **61.5** (2013): 1624-1638.

15.Xu, C., et al. “Control of dislocation density maximizing precipitation strengthening effect.” J. Mater. Sci. Tech., **127** (2022): 133-143.

16.Lin, Y. C., et al. “Precipitation hardening of 2024-T3 aluminum alloy during creep aging.” Mater. Sci. Eng. A, **565** (2013): 420-429.

17.Pantelakis, Sp., et al. “Creep resistance of aluminium alloys for the next generation supersonic civil transport

aircrafts." Theo. App. Frac. Mech., **31.1** (1999): 31-39.
18.Cha, Jong Hyun., et al. "Variation of supersonic aircraft skin temperature under different Mach number and structure." J. Kor. Inst. Mil. Sci. Tech., **17.4** (2014): 463-470.
19.Kovarik, L., et al. "SA Court, HL Fraser, MJ Mills." Acta Mater., **56.17** (2008): 4804-15.
20.Parel, T. S., S. C. Wang, and M. J. Starink. "Hardening of an Al–Cu–Mg alloy containing Types I and II S phase precipitates." Mater. Des., **31** (2010): S2-S5.
21.Guía-Tello, J. C., et al. "Effect of plastic deformation on the precipitation sequence of 2024 aluminum alloy." J. Mat. Sci. (2022): 1-14.
22. Lee, Seunggwan, and Chungseok Kim. "Dissolution and Melting Phenomenon of Al 2 Cu according to Solution Treatment Temperature of Al12Si3Cu alloy." J. Kor. Soc. Heat Treatment **35.1** (2022): 1-7.
23. Wang, Lei, et al. "Superior high creep resistance of in situ nano-sized TiCx/Al-Cu-Mg composite." Scientific reports **7.1** (2017): 4540.