

<연구논문>

Al 2024를 이용한 Conflat Flange Gasket의 특성

이철로 · 박재홍 · 홍승수 · 임재영 · 신용현 · 정광화

한국표준과학연구원 진공연구실
(1992년 4월 3일 접수)

Characteristics of Al 2024 Conflat Flange Gaskets

C. R. Lee, J. H. Park, S. S. Hong, J. Y. Leem and Y. H. Chung

Korea Research Institute of Standard and Science Vacuum Laboratory
(Received April 3, 1992)

요 약—Al 2024-T4와 이것을 annealing한 Al 2024로써 2가지의 gasket을 제조하여, 이들을 XHV chamber에 이용하므로써 2×10^{-12} torr에 도달하였다. 그리하여 이 gasket들의 baking 전후 microstructure, 경도, 응력집중 등의 변화를 조사하였다. Al 2024-T4의 경우에는 edge 높이(H) 감소 및 edge angle(α) 증가 등과 같은 knife edge damage가 존재하나, Al 2024의 경우에는 전혀 damage가 없어서 완전한 capture seal을 할 수 있으리라 사료된다.

Abstract—Two gaskets of Al 2024-T4 and annealed Al 2024-T4 were made. We had acquired 2×10^{-12} torr in a chamber using them. Microstructures, hardness and stress concentration of the gaskets were examined before and after baking. Knife edge damages such as decrease of edge height(H) and increase of edge angle(α) were found on knife edges when the Al 2024-T4 gasket was used. But no damage was found with the annealed Al 2024 gasket.

1. 서 론

1974년 이전까지는 초고진공재료로써 모두 스테인레스 스틸이 사용되어지다가 미국, 서독 등에서 Al 합금으로써 진공 chamber와 부품 및 가속기 beam duct 등에 사용하기 시작하였다. 이 Al 합금은 고진공에서 우수한 저 outgassing 특성과[1] 연성 이외에 가속기 및 원자로에서 중성자, 전자빔 등의 조사(irradiation)에 대하여 매우 빠른 감쇄능을[2] 가지고 있어서 이들에 대한 조사손상(irradiation damage)을 감소시킬 수 있다. 그러나 이들을 기존의 스테인레스 스틸과 조합하여 사용할 경우 SUS/Al 합금간의 접합에 대한 문제, Al 합금에 의한 벨로우즈 및 플렌지 제작 등에 문제점이 있다. 그러나 이들은 1000 계열까지 여러 가지 합금을 design함으로써 강도와 경

도를 제어할 수 있으므로 진공부품 및 chamber 제작에 있어서 특성에 맞는 합금을 선택하여 사용할 수 있다. 대표적인 Al 합금 및 이들의 기본적인 화학적 성분은 다음과 같다. 즉 1000계(pure Al), 200계(Al-Gu), 4000계(Al-Si), 5000계(Al-Mg), 6000계(Al-Mg-Si), 7000계(Al-Zn-Mg) 등이다. 이들은 각각의 열이력, 가공이력 등에 따라서 기계적, 물리적 성질이 다르게 되며 결정의 미세구조 역시 상이하다. 이들 대부분의 합금은 열이력을 가지지 않을 경우 가공경화 거동을 나타내며 열처리시에 aging 효과를 나타낸다. 일반적으로 진공부품 각각에 대하여 사용되는 Al 합금은 플렌지(Al 2219-T87), 가스켓(Al 1050-H18), 볼트(Al 2024-T4), 너트(Al 6061-T6), 와셔(Al 2017-T3), 벨로우즈(용도에 따라 Al 1050, Al 3004, Al 5052, Al 6061) 등[3]이다. 이들 중에서 플렌지

및 가스켓은 저 outgassing 특성 이외에 강도, 경도, 연신특성 등을 충분히 고려하여야 한다. 왜냐하면 그림 1에서 나타나듯이 conflat 플렌지는 양쪽의 knife edge가 가스켓을 indenting하므로써 기밀을 유지하는 capture seal 기구이다[4, 5]. Knife edge에 의하여 직접 압축을 받는 부분(B)는 완전한 소성변형이 되고 나머지 부분(A)에서는 탄성변형을 하여 탄성변형거동을 하는 가스켓 부분이 knife edge 근처 가스켓 seal 부분을 압축하므로써 기밀을 유지하게 되는데 이는 고온상태에서도 마찬가지이다. Conflat 플렌지의 knife edge는 소성변형이 발생되지 않아야 하므로 항복응력(yield strength), 최대인장응력(upper tensile strength), 경도 특성측면에서 볼 때 knife edge 재료 특성이 가스켓 재료의 특성보다 훨씬 우수하여야 하며 또한 knife edge 끝부분이 indenting 동안에 충분한 정수압을 받을 수 있도록 설계하여야 한다. 그림 1에서 나타나듯 가스켓이 conflat 플렌지의 clamping시에 압축을 받게되고 knife edge 끝부분이 정수압을 받게되면 knife edge와 가스켓 재료의 항복응력 및 최대인장응력이 같다고 하여도 clamping시 가스켓에 상당한 깊이의 dent를 나타내게 된다. 물론

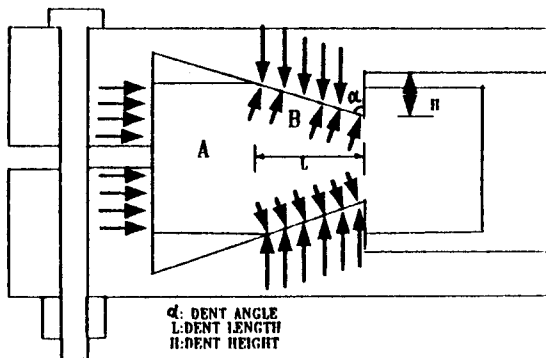


그림 1. Capture seal mechanism of conflat flange.

이 경우에 knife edge 끝 역시 소성변형이 발생되며 edge angle α 가 상대적으로 증가하게 된다. 초고진공에서 가스켓은 현재까지 OFHC를 주로 사용하며 Al 합금으로는 Al 1050-T87를 이용한다. 그러나 본 연구실에서는 Al 2024를 이용하여 가스켓을 제작하여 사용하므로써 일정 chamber 내에서 최저도달압력이 2×10^{-12} torr에 도달한 바 있다[6]. Al 합금의 저 outgassing 특성은 잘 알려져 있다. 그리하여 본 연구에서는 기존의 OFHC 가스켓 및 Al 2024-T4, annealed Al 2024-T4로써 가스켓을 제조한 후 clamping 전후, baking 전후의 미세구조변화와 응력집중부 변화, 경도변화 등을 조사하고 OFHC와 비교하므로써 기계적 특성 측면에서 Al 2024의 가스켓 재료로의 사용가능성 문제를 타진하였다.

2. 실험방법

표 1은 3가지 가스켓 재료의 종류, 화학성분 및 사용전 경도값을 나타낸다. 첫번째의 Al 2024는 Al을 기지금속으로 하고 Cu, Mg, Mn 등이 합금원소로 첨가되어져 있으며 상용화 되는 구조용 Al 합금 재료이다. 이 재료는 Al 2024-T4이며 Al, Cu, Mn 등이 고강도 유지를 위하여 석출강화된 것으로써 높은 강도 및 경도를 나타낸다. 이 시편의 경도는 Vickers 경도로써 135 Hv를 나타내며 이것을 $350^\circ\text{C} \times 3 \text{ Hr}$ 조건으로 annealing 열처리하여 조직 내에 석출된 석출물(PPT)를 다시 기지금속에 고용시키므로써 강도 및 경도를 저하시켜 83 Hv를 얻었다. 이 재료의 조성을 EDAX(Energy Dispersive Analysis X-ray)에 의해 분석한 성분 및 peak는 그림 2와 같다. OFHC는 Varian(미국)사에서 제작된 가스켓으로 이의 사양은 최소한 99.95 wt%의 Cu를 함유하고 산소함유량이 8 ppm 이하인 무산소동으로 제작된 것이며 이것의

표 1. Chemical composition(wt%) and hardnesses(Hv) before use of various gasket materials

No	Gasket material	Hardness (Hv)	Chemical composition(wt%)			
			Al	Cu	Mg	Mn
1	Al 2024-T4	135	92.41	5.41	1.95	0.23
2	Al 2024	83				
3	OFHC	100		99.95(MIN)		

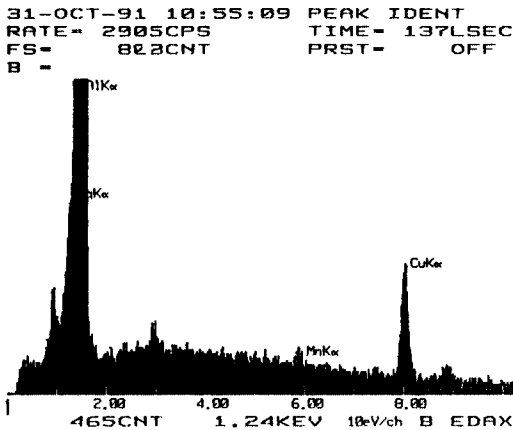


그림 2. Result of EDAX on Al gasket material.

초기 경도값은 100 Hv를 나타낸다. 그림 3은 초기상태에서 각각의 미세구조를 주사형전자현미경(SEM)으로 관찰한 것으로써 (a)는 OFHC, (b)는 annealing 안된 상태의 Al 2024-T4, (c)는 annealing된 상태의 Al 2024이다. (a)는 전형적인 Cu의 미세구조를 나타내는데 2차원적으로 보면 결정립의 크기가 약 10-30 μ m 정도의 범위에 있다. (b)의 annealing 안된 Al 2024의 미세구조에서 결정립 사이에 hole처럼 보이는 부분은 CuMgAl_2 , $\text{Cu}_2\text{Mn}_3\text{Al}_{20}$ 과 같은[7] 석출물들이 존재하는 자리로써 이들로 인하여 석출강화되어지고 결국 강도 및 경도가 높은 상태로 된다. 초기에 주조 및 압연 등으로 가공된 재료는 Al 기지금속내에 Cu, Mg, Mn 등이 모두 고용되어 있으나 이것을 200°C 정도로 가열후 서냉, 고온시효시킴으로써 CuMgAl_2 , $\text{Cu}_2\text{Mn}_3\text{Al}_{20}$ 등의 석출물 등이 석출된다. (c)는 이 Al 2024-T4를 390°C에서 약 3시간 annealing 하여 석출물들을 다시 Al 기지금속내에 고용시킴으로써 강도 및 경도를 저하시키며 연성을 더욱 좋게 한 것이다. 조직사진에서 나타나듯이 석출물들이 거의 존재하지 않으며 결정립들은 (b)에 비하여 더욱 미세화 되어 강도는 더욱 저하되었다. 시험편의 제작은 다음과 같다. 3가지 종류의 가스켓을 2.75인치 conflat 플렌지 3개 각각의 이용하여 clamping 하는데 이 때에 가스켓 및 플렌지는 일정위치를 표시하여 반복시 그 위치가 재현되도록 하였다. 이들 가스켓들은 고진공 chamber에서 탈가스를 위해 실시하는 baking과 같은 온도 및 시간으로써 진공 열처리를 하였으며 이 모든 경우에 대하여 indent의 단면, 미세구조변화, 응력집중, 경도

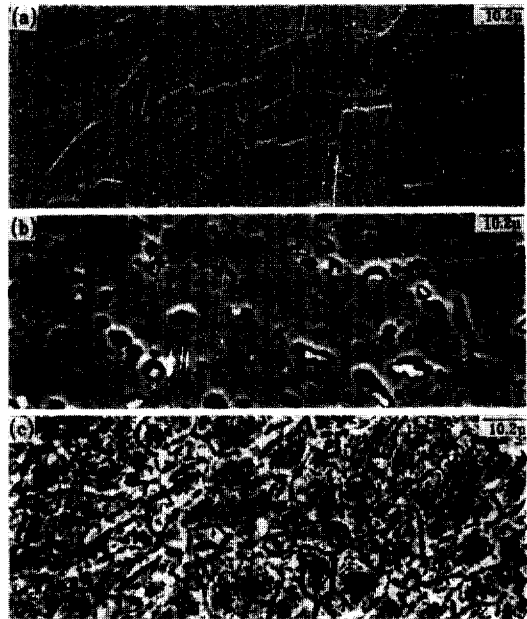


그림 3. Microstructure of various gasket material before use

(a) OFHC; (b) Al 2024-T4; (c) Al 2024.

분포 등을 조사하였다.

3. Baking전 dent 단면, 미세구조, 경도분포 및 응력집중부

2.75인치 conflat 플렌지에 각각 3가지 종류의 가스켓을 이용하여 clamping한 후 dent 단면 및 dent 주위 미세구조를 조사하였다. 그림 4는 OFHC의 경우이며 (a)는 indenting후 예리한 edge 단면을 나타낸다. 응력집중부는 dent 주위에 국한되어져 있으며 (b) 사진에서 나타나듯 이 영역은 그림 3(a)와 비교하면 결정립들이 응력집중부 쪽으로 연신되어 있고 여러 영역의 Vickers 경도 측정결과 응력집중부는 knife edge와 아주 근접한 부분 즉 아주 국부적인 부분에만 국한됨을 알 수 있었다. 그림 5는 annealing 안된 Al 2024-T4이며 그림 4(a)의 같은 비율에서도 알 수 있듯이 dent 깊이는 OFHC에 비하여 현저하게 적다. 이는 Al 2024-T4의 석출강화 및 응력증가에 따른 가공경화가 겹쳐져서 상대적으로 강도가 높아지게 된것[8,9]이다. 이 경우에 SUS knife edge에 의한 dent를 그림 1에 나타나는 각 α , 높이 H, 길이 L로 표시하여 특성화하면 각각 148°, 180 μ m,

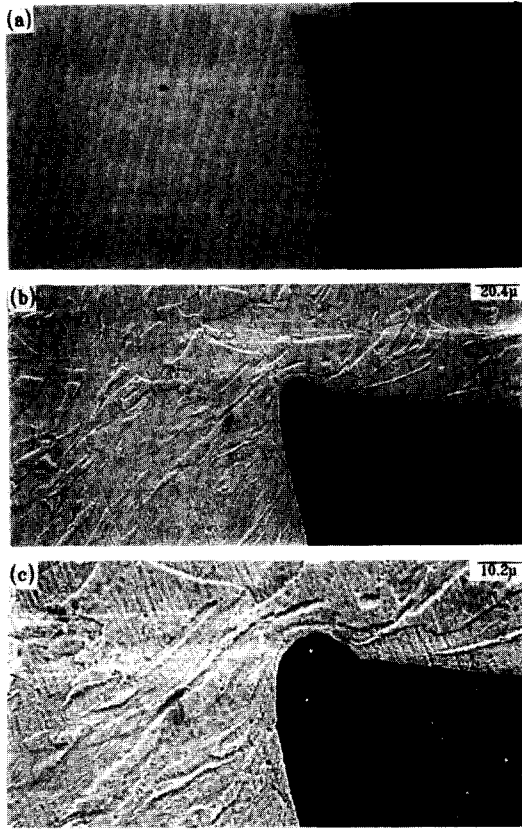


그림 4. Microstructure of OFHC around dent.

11800 μ을 나타낸다. 이 값은 뒤에 열거할 annealing된 Al 2024에 비하여 상당한 차이를 나타내며 이에 수반되어 knife edge에 의하여 응력을 직접적으로 받는 근접부근에서는 미소균열 및 스크래치 등의 damage

가 발생하는 경우도 있다(그림 5(c)). 그리고 그림 5(b)의 dent 근방 미세구조는 그림 3(b)와 비교하면 결정립들이 연신되어 있고 석출물들이 그대로 존재하며 응력집중부는 넓게 분포되어 있다. 이 응력분포는 그림 6에 나타난 것처럼 3영역으로 구분됨을 미세구조 및 경도분포로써 알 수 있다. 영역 A는 응력이 최고로 집중된 부분으로써 주응력집중부이며 영역 B는 2차응력집중부, 영역 C는 응력집중이 안된 상태이다. 응력이 발생되면 변형이 되고 응력집중에 따라 전위이동이 어려워져서 전위가 pile up되며 결국은 경도가 증가하게 되며 annealing 안된 Al 2024-T4는 가스켓으로 사용이 어렵다고 사료된다. 본 연구에서 중점을 둔 재료는 annealing된 Al 2024의 경우이며 이것은 앞서의 2가지의 가스켓 재료와는 달리 dent 형상의 재현성을 관찰하였다. 즉 annealing된 Al 1024 gasket을 처음 knife edge로 indenting 하였을 때 knife edge damage 유무, 각 α, 높이 H 및 길이 L 변화를 관찰하였다. 그림 7의 (a1), (a2)는 똑같은 위치의 knife edge에 대하여 2번을 반복하여 clamping한 경우의 dent 단면이고 (a1)은 첫번째, (a2)는 2번째이다. (a1)의 H 즉 H_{a1}, (a2)의 H, H_{a2}, (a1)의 α, α_{a1}, (a2)의 α, α_{a2}, (a1)의 L 즉 L_{a1}, (a2)의 L 즉 L_{a2}는 다음과 같다.

$$H_{a1} = 330 \mu \quad \alpha_{a1} = 68.5^\circ \quad L_{a1} = 9960 \mu$$

$$H_{a2} = 329 \mu \quad \alpha_{a2} = 68^\circ \quad L_{a2} = 9700 \mu$$

Edge 높이, 길이, 및 각의 변화가 거의 없다. 또 knife edge damage 역시 관찰되지 않았으며 이의 결과로

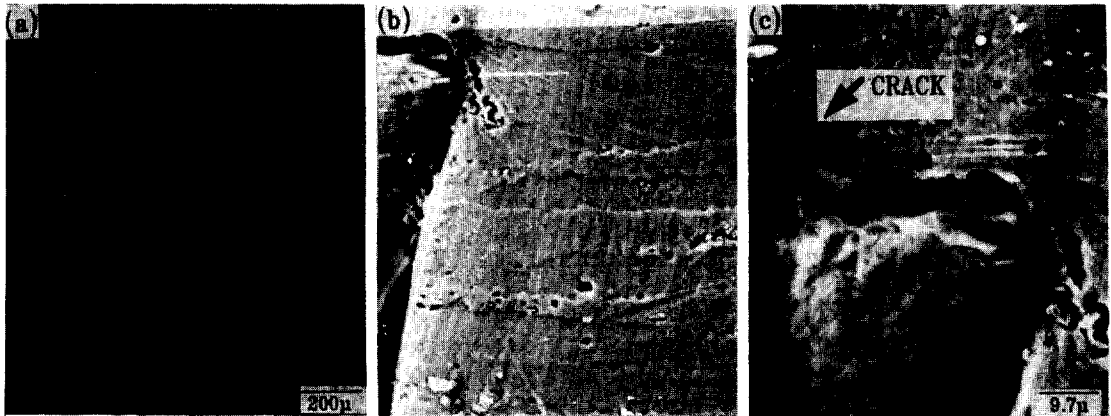


그림 5. Microstructure of Al 2024-T4 around dent before baking.

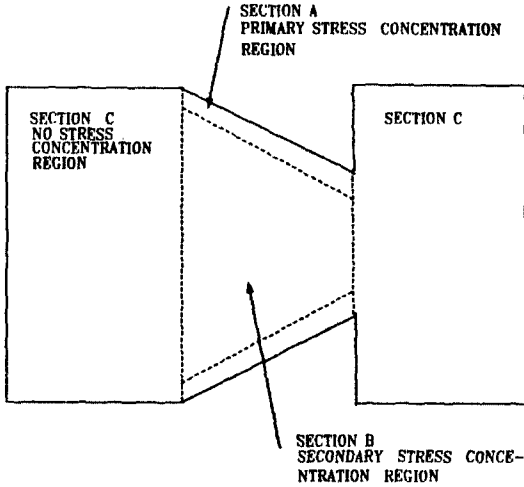


그림 6. Stress profile of Al gasket after clamping.

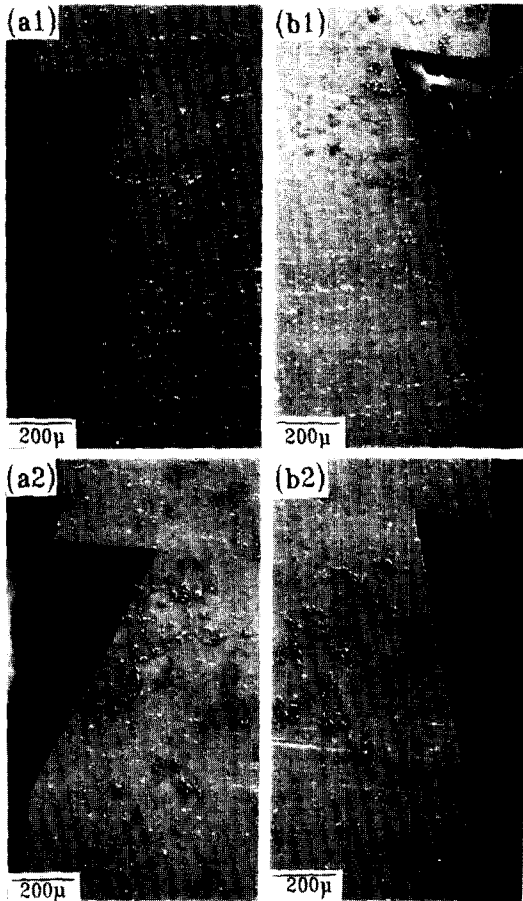


그림 7. Dent profile of two knives after clamping.

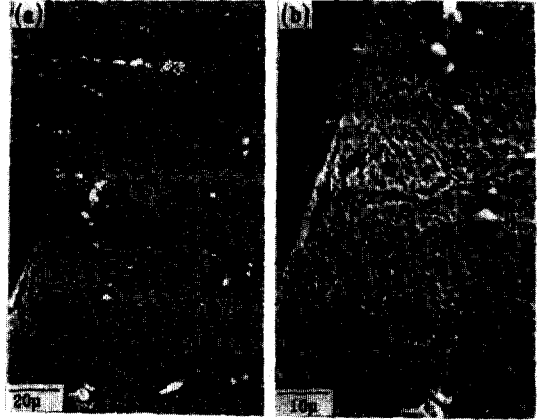


그림 8. Microstructure of Al 2024 around dent.

보아 강도나 경도적인 측면에서 가스켓 재료로써 거의 문제가 없는 것으로 사료된다. 그림 7의(b1), (b2)는 또다른 knife edge에 대한 것으로 위와 마찬가지로 방법으로 각 α , 높이 H 및 길이 L 변화를 보면 아래와 같다.

$$H_{b1} = 320 \mu \quad \alpha_{b1} = 66.2^\circ \quad L_{b1} = 9930 \mu$$

$$H_{b2} = 280 \mu \quad \alpha_{b2} = 66.0^\circ \quad L_{b2} = 9710 \mu$$

여기에서 역시 각의 변화는 없으며 다만 H 및 L의 변화가 다소 존재한다. 이것은 시편의 polishing시 불균일한 연마에 기인된 것으로 생각된다. 결국 똑같은 conflat 플렌지에 대한 clamping 결과 annealing 안된 Al 2024-T4는 annealing된 Al 2024에 비하여 α 및 L은 크고 H는 적다. 이것은 clamping시에 conflat 플렌지의 knife edge가 Al 2024-T4 고강도에 대하여 많은 damage를 받았으며 SUS knife edge 끝부분이 항복응력 이상의 응력 받게 됨에 따라 소성 변형되어 졌음을 의미한다. 그림 8은 annealing된 Al 2024의 dent 주위 미세구조이다. 그림 3(c)와 비교하면 knife edge 부근에서의 미세구조변화가 많으며 annealing 안된 Al 2024-T4와 마찬가지로 3가지의 응력분포구역으로 나뉘어진다.

4. Baking후 dent 단면, 미세구조 및 경도 분포

Baking후 경도분포 및 미세구조 변화를 관찰하기 위하여 초고진공 시스템 내에서 받게 되는 gasket의

표 2. Hardness profile(Hv) in various gasket material

No	Gasket	State					
		Before baking			After baking		
		Section A	Section B	Section C	Section A	Section B	Section C
1	Al 2024-T4	157	145	135	135	124	116
2	Al 2024	97	90	82	90	81	75.2
3	OFHC	No difference 100					

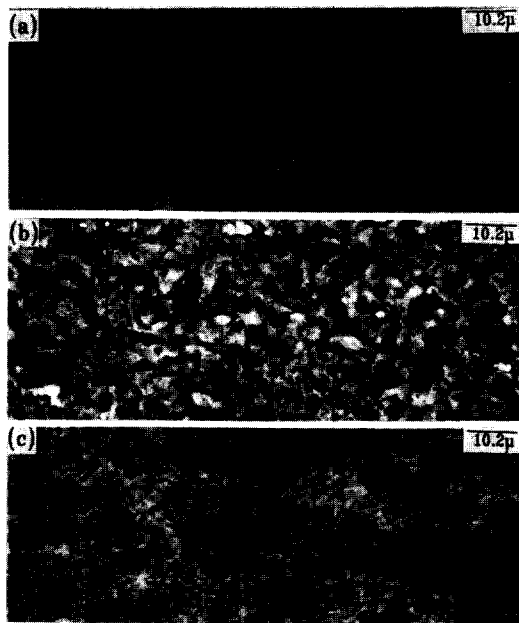


그림 9. Microstructure of various gasket materials around dent after baking.

(a) OFHC; (b) Al 2042-T4; (c) Al 2024.

열이력과 같은 열처리를 하였다. Al 경우는 $180^{\circ}\text{C} \times 24$ hr, Cu는 $250^{\circ}\text{C} \times 24$ hr의 진공 열처리를 실시하였다. 우선 baking 전후에 3가지의 응력집중부 및 이에 따른 경도변화를 관찰한 결과는 표 2와 같다. Annealing 된 것과 안된 것 모두의 Al 2024 경우에 baking 후에도 dent 주위에 3가지의 응력분포를 가지고 있으며 전반적으로 경도값의 저하를 초래하였다. Annealing 안된 Al 2024-T4의 경우는 주응력집중부의 경우 157 Hv에서 135 Hv로 감소되었다. 그 이유는 그림 9(b)와 그림 3(b)의 비교에서 알 수 있듯이 baking 처리에

따라 annealing 효과를 초래하여 많은 석출물들이 다시 고용체를 형성하고 잔류하는 석출물들도 크기가 감소하였기 때문이다. 그러나 3개의 응력집중부가 잔존하는 것으로 보아 잔류응력이 완전히 방출되지 않고 잔존한다는 것을 알 수 있다. Annealing된 Al 2024의 경우에는 97 Hv에서 90 Hv로 다소 감소되었는데 이것은 이미 석출물들이 Al 기지금속내에 고용된 상태에서 baking에 의해 잔류응력들이 방출됨에 따라 정도값이 다소 저하된 것이다. 또 C 구역이 baking 전에 비하여 후에 정도값이 약 7 Hv정도 감소한 것은 baking에 따라 결정립 크기가 감소된 것에 기인된 것이다. OFHC의 경우에는 baking 전후에 응력집중부의 분포가 발견되지 않았으며 경도의 분포 역시 발견되지 않았다. 그림 9는 baking 후 dent 주위의 미세구조를 나타내는데 baking 전 dent 주위의 변형되었던 결정립들은 발견되지 않았다. (a)는 OFHC, (b)는 annealing 안된 Al, (c)는 annealing된 Al 2024이며 그림 3과 비교하면 OFHC의 경우 결정립은 다소 성장되고 Al 합금의 경우에는 grain 크기가 감소하였다.

5. 결 론

Annealing된 Al 2024-T4를 이용한 가스켓을 OFHC 가스켓과 강도 및 경도의 측면에서 conflat flange용 가스켓으로써의 타당성 여부를 조사 연구한 결과 다음과 같은 결론을 구하였다.

1. OFHC의 경도는 100 Hv 정도이고 baking에 의하여 미세결정립의 크기가 약간 증가하였으나 gasket 재료의 경도변화는 없었고 knife edge에 의한 dent 부근의 경도 분포도 균일하여 응력집중현상이 없었다.

2. Al 2024-T4의 경도는 135 Hv로써 stainless steel과 거의 비슷한 정도이다. Clamping시 미소균열이 발생할 수 있으며 dent 부근에 항복응력 이상의 응력을 받게 되어 소성변형이 일어나므로 일반적인 gasket 재료로는 부적합하다.

3. Annealing한 Al 2024의 경도는 83 Hv로써 다소 연한 편이나 clamping하면 dent 부근의 응력집중 효과로 경도가 97 Hv까지 증가한다. 재료의 기계적 특성으로 볼 때에는 knife edge damage, 각 α , 높이 H, 길이 L 등의 변화 없이 capture seal을 완전하게 할 수 있으리라 사료된다.

. *Tech.*, A5, 371 (1987).

2. 石丸, KEK-ASN-III, Jan (1978).

3. 筑波研究コンソミアム, 極高眞空發生計測利用技術 (=關する調査, 61 (1988).

4. 石丸, 日本金屬學會會報, 第23卷, 第7號, 614 (1984).

5. 中村, 和幸等, 眞空, 第23卷, 第7號, 620 (1989).

6. K. H. Chung *et al.*, *Vacuum accepted for publication* (1992).

7. Metal Handbook, Vol. 7, 242 (1972).

8. K. R. Van Horn, *Aluminum*, Vol 1 (1967).

9. L. F. Mondolfo, *Aluminum Alloys-Structure and Properties* (1976).

참고문헌

1. Maki Suemitsu, Tetsuya Kaneto *et al.*, *J. Vac. Sci.*