

AL 2024-T3의 단시간 고온 강도 특성

Strength Characteristics of An Aluminum 2024-T3 in Short-time High Temperature Environment

이 열 화* 김 재 영* 김 현 주* 박 경 민* 김 종 환*
Yeol-Hwa Lee*, Jae-Young Kim*, Heon-Joo Kim*, Kyoung-Min Park*, Jong-Hwan Kim*

ABSTRACT

The main purpose of this paper is to investigate strength characteristics of Aluminum 2024-T3 in high temperature environment. Tensile test of Aluminum 2024-T3 has been carried out in high temperature environment. The stress-strain relations are investigated with temperature and Young's modulus, yield strength and ultimate strength are deduced from the test results. The modulus and strength of the test are compared with those of MIL HANDBOOK and tips on structural design in high temperature environment are suggested.

주요기술용어 : Strength characteristics in high temperature(고온강도특성), Tensile test(인장시험)

1. 서 론

본 연구에서는 알코아 사의 알루미늄 2024-T3의 고온 특성을 고찰하고자 한다. 유도무기에 적용되는 알루미늄의 강도는 MIL 핸드북의 데이터를 주로 사용하고 있다. 그러나 MIL 핸드북의 데이터는 보편적인 데이터이기 때문에 특정 회사의 실제 데이터와는 차이가 있을 수 있다. 특히 고온 데이터의 경우 MIL 핸드북이 제공하는 최소 가열 시간이 30분이기 때문에 온도 유지시간이 그보다 짧으면 상당히 보수적인 설계가 불가피하다. 따라서 본 시험을 통하여 단시간

의 고온 강도 특성을 규명하여 MIL 핸드북과의 차이를 고찰하여 향후 설계에 적용하고자 한다.

시험은 ASTM(American Society for Testing Materials) 규격에 따라 두 가지 시험 조건에 대하여 수행하였다. 시험 조건 I은 시험의 온도를 10분 동안 시험 온도로 상승시킨 후 30분 동안 시험 온도로 유지하여 강성과 강도를 측정하는 것이다. 시험 조건 I은 MIL HDBK과의 비교 데이터를 만들기 위하여 수행하였다. 시험 조건 II에서는 열하중에 노출되는 시간에 따른 영향을 보기 위하여 10분 동안 시험 온도로 상승시킨 후 5분 동안 시험 온도를 유지하여 인장 시험을 수행하였다. 시험의 가열은 MTS사의 고온 가열로를 사용하였으며 시험 온도는 상온과 100℃,

* 국방과학연구소

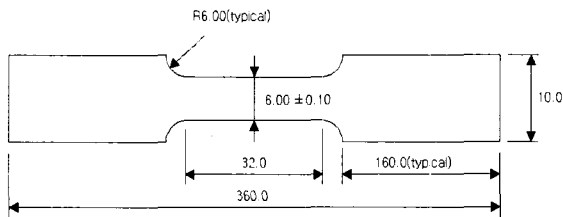
200℃, 300℃로 하였다.

온도에 따른 응력-변형률 선도의 변화를 고찰하였고, 인장강성(tensile stiffness, E), 항복강도(yield strength, σ_Y), 극한강도(ultimate strength, F_m)를 MIL HDBK의 데이터와 비교하여 제시하였다.

2. 시편의 제작 및 시험 방법

2.1 시편의 제작

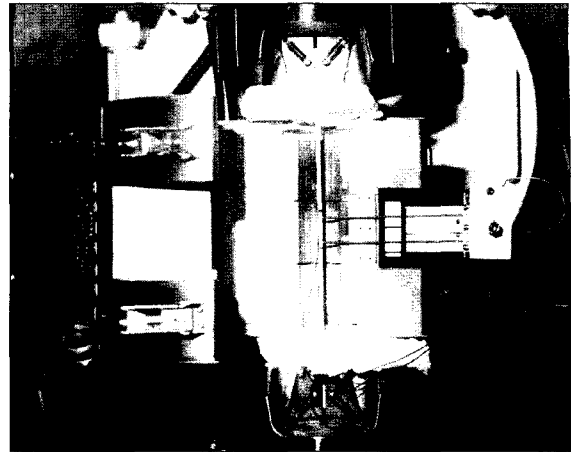
시편의 형상은 ASTM E-8M[2]을 참고로 하여 Fig. 1과 같은 형태로 제작하였다. 알코아 사의 알루미늄 2024-T3로 제작하였다. 시편의 두께는 많이 사용되는 두께인 0.125 인치로 하였다. 제작된 시편은 치수 및 가공 상태를 검사하여 합격인 시편만을 시험에 사용하였다.



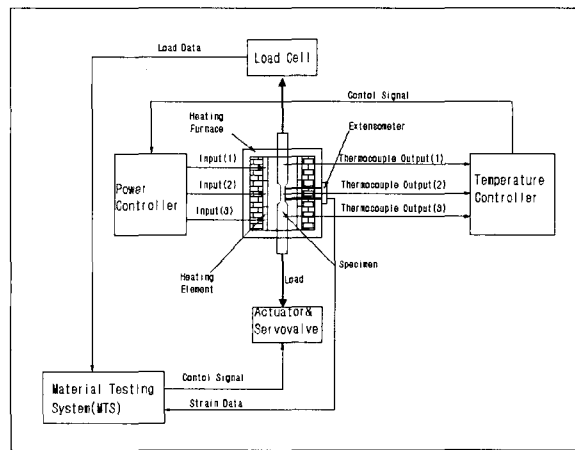
[Fig. 1] Dimension of test specimen

2.2 시험 방법

시험은 MTS사 고온 가열로(온도 범위: 1000℃)와 인장시험기를 사용하였다. Fig. 2에 시편이 장착된 고온 가열로의 모습을 나타내었다. 시편의 길이 방향으로 세 개의 온도 영역을 설정한 다음 온도 제어기로 시편의 온도를 제어하였다. 시험 데이터는 인장시험기 로드셀의 하중 신호와 시편의 중앙부에 부착한 변위계(extensometer)의 변위 신호를 획득하였다.(Fig. 3 참조)



[Fig. 2] Photograph of heating furnace and specimen



[Fig. 3] Schematic diagram of test apparatus

시험 조건 I에서는 시편의 온도를 10분 동안 시험 온도로 상승시킨 후 30분 동안 유지시킨 다음 헤드 속도를 1 mm/min로 하여 인장 시험을 수행하였다. 시험 조건 II에서는 시험 조건 I과 같은 조건이나 온도 유지 시간을 5분으로 단축한 후 시험을 수행하였다. 시편의 개수는 상온과 100℃, 200℃의 경우에는 3 회 이상의 시험을 수행하였으며, 300℃의 경우에는 보다 정확한 데이터를 얻기 위하여 4 회 이상을 시험

하였다. 시험조건 I에 대한 시험 결과, 시험 온도가 100℃인 경우 상온의 것과 유사한 결과를 가지는 것으로 관찰되어 시험 조건 II에서는 200℃, 300℃에 대한 시험만을 수행하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 온도에 따른 응력-변형률 선도의 변화

Fig. 4에는 시험 조건 I(30분 유지)과 시험 조건 II(5분 유지)의 환경에서 각 온도의 첫 번째 시험에 대한 응력-변형률 선도를 나타내었다.

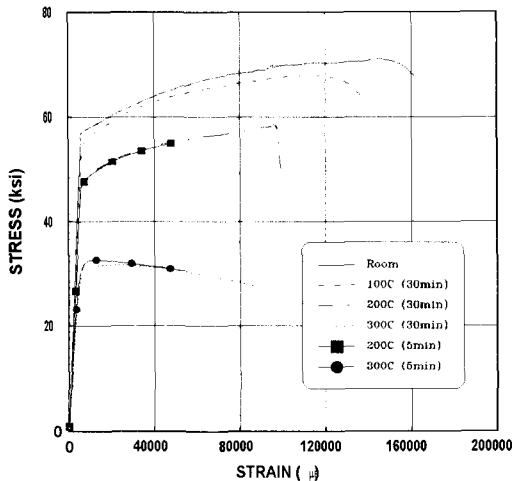
상온인 경우의 응력-변형률 선도는 항복이 일어난 후 계속하여 응력이 증가하는 변형 경화(strain hardening) 현상이 일어나는 등 알루미늄의 전형적인 응력-변형률 선도이었다. 100℃인 경우의 응력-변형률 선도는 상온의 것과 비슷한 경향을 나타내었다. 시험 온도가 200℃인 경우 상온인 경우보다 파단에 도달했을 때의 변형률이 작아 지고 항복점 이후에 변형 경화 현상이 나타나는 구간도 줄어들었다. 300℃의

경우에는 항복점 이후에 변형 약화(strain softening) 현상이 나타나 항복점이 바로 극한점이 되었다. 따라서 구조물의 온도가 300℃ 이상일 때 항복이 일어나게 되면 구조물의 소성 영역이 급격히 확대되어 갑작스러운 파괴에 도달하게 될 것이므로 설계에 주의를 요한다.

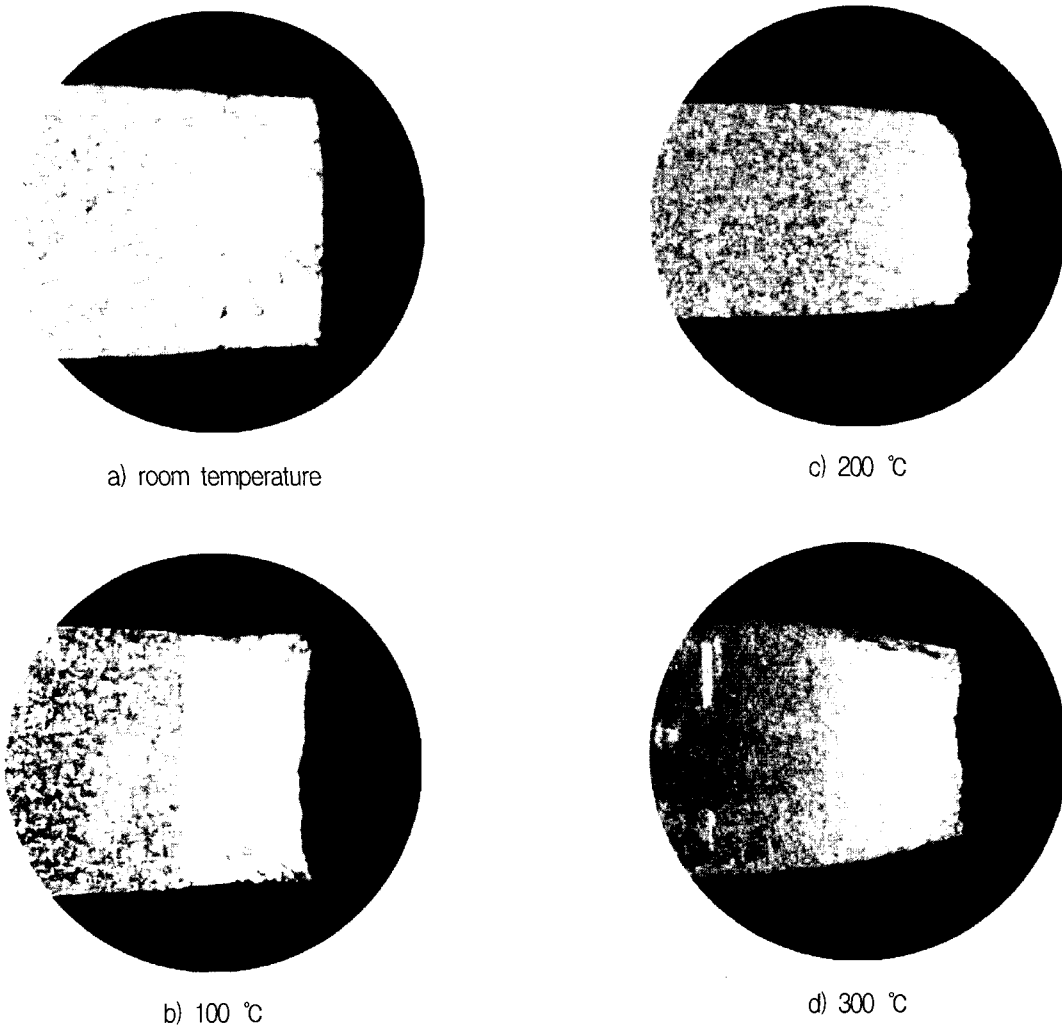
유지 시간을 30분으로 한 경우와 5분으로 한 경우의 응력-변형률 선도의 경향을 비교하면 200℃와 300℃ 모두 유지 시간에 대한 차이를 나타내지 않았다. MIL HDBK의 데이터를 보면 시편이 고온 환경에 노출된 시간(30분 이상의 시간)에 따라 강도의 변화가 상당히 크게 나타나 본 시험의 결과로부터 30분 이하의 시간에 대하여서는 비슷한 경향을 나타낸다고 할 수 있다.

시험 온도에 따른 시편의 파단 양상을 Fig. 5에 나타내었다. 시험 조건 I과 시험 조건 II는 같은 경향을 나타내었으므로 시험 조건 I에 대한 파단 양상만을 나타내었다. Fig. 5 a)는 상온의 경우로 45° 기울기로 파단면이 형성되는 경향을 나타내었다. 시험온도가 100℃인 경우에는 상온과 마찬가지로 45° 기울기로 파단면이 형성되었다.(Fig. 5 b)) 시험온도가 200℃의 경우에는 45° 기울기로 파단된 경우와 단면적이 급격히 줄어드는 넥킹 현상을 수반하는 인장 모드의 파단 양상이 동시에 관찰되었다.(Fig. 5 c)) 시험온도가 300℃의 경우에는 인장 모드의 파단 양상만이 관찰되었다.(Fig. 5 d))

상온인 경우 45° 기울기로 파단면이 형성되는 것은 최대 전단 응력이 작용하는 면을 따라 파단이 형성되는 것으로 일반적인 알려진 현상이다. 시편의 온도가 올라가면 부재의 연성(ductility)이 증가하여 넥킹 현상이 두드러지게 나타나 파단면이 45°가 아닌 하중방향의 직각으로 형성되는 인장 모드의 파단면이 형성되는 것으로 생각된다.



[Fig. 4] Stress-strain curve of Aluminum 2024-T3 under various temperature conditions



[Fig. 5] Failure mode of tested specimen

3.2 시험 결과

Table 3에는 유지 시간이 30분인 시험 조건 I에 대하여 인장 강성, 항복 강도 및 극한 강도 결과를 나타내었다. Fig. 4를 보면 선형 구간(linear region)이 뚜렷이 나타나므로 인장 강성을 쉽게 구할 수 있으며 본 시험에서는 선형 구간인 변형률이 0.002(2000 $\mu\epsilon$) 일 때의 평균 기울기를 인장 강성으로 하였다. 항복 강도는 알루미늄과 같이 명확한 항복점이 나타나지 않는 경우에 일반적으로 사용되는 0.2 % 오프셋 항복

[Table 1] Test results of condition I (5 min rise, 30 min maintain)

item specimen	E		σ_y		Ftu	
	(Msi)	ave.(Msi)	(ksi)	ave.(ksi)	(ksi)	ave.(ksi)
room-#1	10.6	10.5	56.3	56.8	70.3	70.7
room-#2	10.3		56.1		70.3	
room-#3	10.1		57.4		71.1	
room-#4	10.8		57.3		71.1	
100°C-#1	9.6	9.6	55.4	55.4	68.2	67.9
100°C-#2	9.6		55.4		68.2	
100°C-#3	9.7		55.3		67.4	
200°C-#1	9.1	9.0	48.2	48.5	58.3	57.9
200°C-#2	9.2		49.5		58.1	
200°C-#3	8.7		47.9		57.3	
300°C-#1	7.0	7.2	30.3	29.3	31.8	30.5
300°C-#2	7.7		32.0		33.3	
300°C-#3	7.1		25.0		25.7	
300°C-#4	6.9		30.0		31.0	

[Table 2] Test results of condition II (5 min rise, 5 min maintain)

item specimen	E		σ_y		Ftu	
	(Msi)	ave.(Msi)	(ksi)	ave.(ksi)	(ksi)	ave.(ksi)
200°C-#1	8.3	8.5	48.0	48.1	58.3	59.0
200°C-#2	8.5		48.6		60.0	
200°C-#3	8.8		47.6		58.7	
300°C-#1	7.6	7.4	31.3	29.8	32.7	31.7
300°C-#2	6.8		26.9		27.9	
300°C-#3	N/A		N/A		34.0	
300°C-#4	8.0		32.3		33.8	
300°C-#5	7.1		28.8		30.3	

강도를 적용하였다. 극한 강도는 시편이 견디는 최대 공칭 응력(nominal stress)이다. 시험 후 시편의 파단 상태를 관찰하여 파단 위치가 게이지 길이 안에 있지 않은 시편은 기록하지 않았다.

3.3 고 찰

Table 1과 Table 2에 수록된 시험결과를 보면 상온과 100°C인 경우 시편 사이의 편차가 작으나 200°C와 300°C의 경우에는 편차가 커짐을 알 수 있다. 이러한 차이는 고온 환경이 될수록 시험 결과가 시편의 가공상태에 민감하게 나타나기 때문이라고 생각된다.

Table 3에 각 시험조건에 대한 탄성계수의 평균치를 MIL HDBK[1] (Figure 3.2.3.1.4)과 비교하여 나타내었다. 이를 보면 각 시험 조건에 대한 결과가 비슷하였으며 MIL HDBK의 결과와도 유사함을 알 수 있다.

Table 4에 두 가지 시험 조건에 대한 온도에 따른 항복강도(yield strength)의 평균치를 MIL HDBK (Figure 3.2.3.1.1(b))과 비교하였고 이를 Fig. 6에 나타내었다. 표에서 백분율로 나타낸 값은 상온의 값을 100으로 하고 각 온도에서의 항복 강도를 비교한 값이다. 시험조건 I과 시험조건 II에 대한 결과가 서로 차이가 없음을 알 수 있으며 두 시험 조건에 대한 결과와 MIL HDBK과는 차이가 나타났다. 상온에서의 항복강도는 본 시험이 MIL HDBK보다 약 20%정도 큰 것으로 측정되었으나 온도가 올라감에 따라 그 차이는 더욱 커져 100°C일 때 약 28%, 200°C일 때 약 31%, 300°C일 때 90% 정도 큰 항복강도를 가지는 것으로 측정되었다. 참고로 평균값이 아닌 최소값을 적용하여 비교해 보면 본 연구의 결과가 상온에서 19%, 100°C에서 27%, 200°C에서 29%, 300°C에서 61% 정도 큰 값을 가진다.

Table 5에 두 가지 시험 조건에 대한 온도에 따른 극한강도의 평균치를 MIL HDBK(Figure 3.2.3.1.1(a))과 비교하였고 이를 Fig. 7에 나타내었다. 표에서 백분율로 나타낸 값은 상온의 값을 100으로 하고 각 온도에서의 인장 강도를 비교한 값이다. 항복강도와 마찬가지로 두 시험 조건 사이의 결과는 차이가 없었으나 본 연구의 결과와 MIL HDBK의 결과는 차이가 있었다. 평균값을 기준으로 할 때 본 연구의 결과가 상온에서 15%, 100°C에서 21%, 200°C에서 20%, 300°C에서 82% 큰 값을 가지며 최소값을 기준으로 하면 상온에서 13%, 100°C에서 20%, 200°C에서 19%, 300°C에서 51% 큰 값을 가지는 것으로 측정되었다. 항복강도 및 인장강도가 MIL HDBK의 데이터와 비교하여 크게 나타난 이유로 생각할 수 있는 것은 첫째로 MIL HDBK의 데이터가 제작사, 제작 로트, 두께, 시편 형태를 달리하는 시편에 대한 시험 결과로 A-Basis 값이기 때문에 보수적인(conservative) 데이터라 할 수 있다. 두 번째로는 MIL HDBK의 경우 알루미늄 2024-T3, T351, T4에 공통으로 적용되는 데이터라고 되어 있는 점이다.

본 시험의 경우 실제 구조물에 적용되는 두께를 가지고 같은 열처리를 한 알루미늄으로 시험을 수행한 것으로 범용으로 적용되는 MIL HDBK의 데이터와 비교할 때 실제 구조물의 강도를 더 정확히 나타내고 할 수 있다. 상온에서는 그 차이가 작으나 온도가 올라감에 따라 큰 차이가 나타났다. 따라서 고온 환경에서 알루미늄 2024-T3의 강도를 MIL HDBK의 결과를 사용하여 구조물을 설계할 경우 강도를 지나치게 낮게 평가하여 무거운 구조물을 만들 수 있다. 고온 환경을 겪는 구조물을 최적 설계(optimal design)하기 위해서는 각 부재의 강도 특성을 엄밀히 고찰할 필요가 있다고 하겠다.

[Table 3] Young's modulus of Aluminum 2024-T3 according to temperature

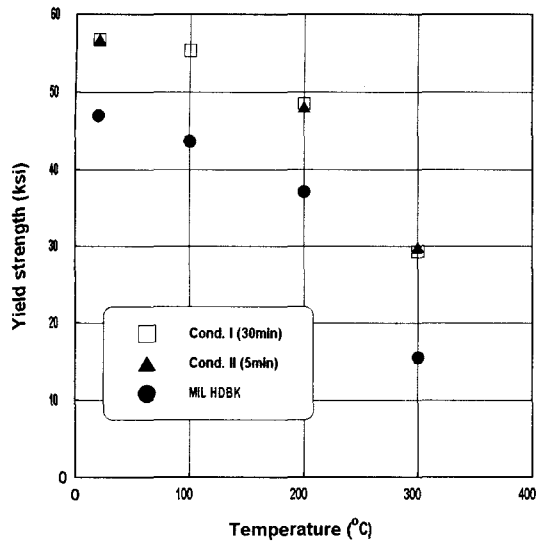
cond. temp.	cond. I (10 min. rise, 30 min. maintain)		cond. II (10 min. rise, 5 min. maintain)		MIL HANDBOOK (exposure at temperature up to 30 min.)	
	E(Msi)	%	E(Msi)	%	E(Msi)	%
room	10.5	100	10.5	100	10.8	100
100 °C	9.6	92	-	-	10.6	98
200 °C	9.0	87	8.5	81	9.7	90
300 °C	7.2	69	7.4	70	7.9	73

[Table 4] Yield strength of Aluminum 2024-T3 according to temperature

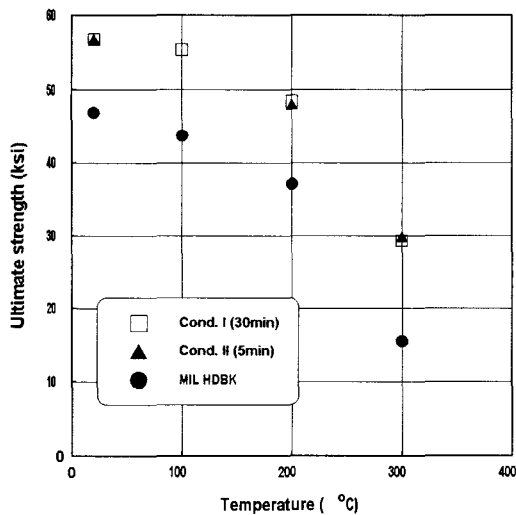
cond. temp.	cond. I (10 min. rise, 30 min. maintain)		cond. II (10 min. rise, 5 min. maintain)		MIL HANDBOOK (exposure at temperature up to 30 min.)	
	σ_y (ksi)	%	σ_y (ksi)	%	σ_y (ksi)	%
room	56.8	100	56.8	100	47	100
100 °C	55.4	98	-	-	43.7	93
200 °C	48.5	85	48.1	85	37.1	79
300 °C	29.3	52	29.8	52	15.5	33

[Table 5] Ultimate strength of Aluminum 2024-T3 according to temperature

cond. temp.	cond. I (10 min. rise, 30 min. maintain)		cond. II (10 min. rise, 5 min. maintain)		MIL HANDBOOK (exposure at temperature up to 30 min.)	
	Ftu(ksi)	%	Ftu(ksi)	%	Ftu(ksi)	%
room	70.7	100	70.7	100	62	100
100 °C	67.9	96	-	-	(56)	91
200 °C	57.9	82	59.0	83	(48)	77
300 °C	30.5	43	31.7	45	(17)	27



[Fig. 6] Variation of yield strength of AL2024-T3 according to temperature



[Fig. 7] Variation of ultimate strength of AL2024-T3 according to temperature

본 시험의 결과를 강도 해석에 적용한 결과 MIL HDBK의 데이터로는 구조적인 안전여유가 없었던 구조물이 본 시험의 데이터를 사용하면 구조적인 안전여유가 충분히 확보됨을 확인하였다.

짧은 시간 동안 열하중에 노출되는 문제를 고찰하기 위하여 시험 조건 II에 대한 시험을 수행하였다. 그러나 시험 결과를 보면 시험 조건 I과 시험 조건 II의 결과가 큰 차이가 없었다. 이러한 결과로부터 본 시험에서는 짧은 시간 동안 열하중을 받는 열충격 문제를 제대로 고찰할 수 없었으며 이 문제는 본 시험과는 다른 방법으로 고찰되어야 한다.[5]

4. 결 론

본 연구는 기체구조물에 적용되는 알루미늄 2024-T3의 단시간 고온 특성을 고찰하기 위하여 두 가지 고온 환경 조건에서 인장 시험을 수행하였다. 온도에 따른 응력-변형률 선도의 변화를 고찰하였고 인장 강성 및 강도를 계측하여 MIL 핸드북의 데이터와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 온도에 따른 응력-변형률 선도의 변화를 보면 온도가 올라감에 따라 변형 경화 현상이 일어나는 구간이 짧아지며 특히, 시험 온도가 300°C 이상인 경우 항복 강도와 극한 강도가 비슷하였으며 항복 이후에 변형 약화 현상이 나타났다. 따라서 구조물의 온도가 300°C 이상으로 올라가게 되면 항복 이후 급속히 구조물의 파괴가 일어날 것으로 예측된다.
- (2) 온도 유지 시간이 5분인 경우와 30분인 경우의 응력-변형률 선도 및 인장 강성, 강도는 차이가 없었다.
- (3) 시험 온도에 따른 알루미늄 2024-T3의 인장 강성과 강도를 MIL HDBK의 데이터와 비교해 보면 인장 강성은 서로 비슷하였으나 강도는 본 연구의 결과가 MIL HDBK보다 20%~30% 크다.

(4) 고온 환경에서 MIL HDBK의 데이터를 사용하는 경우 엄밀한 고찰이 필요하며 무게가 중요시되는 경우 각 재료에 대한 시험을 수행하여 정확한 데이터를 사용하여야 보다 경량 구조물로 최적 설계를 구현할 수 있다.

참 고 문 헌

1. MIL-HDBK-5F, *Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures*
2. "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials[Metric]," ASTM E 8M-88
3. "Standard Practice for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials," ASTM E 21-79
4. "Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus," ASTM E111-82
5. 최형집, 진태은, 이강용, 1998, "열충격하 적층체의 열탄성 구배기능 계면영역을 고려한 동일선상 복수 균열 해석," 대한기계학회논문집 A권, 제 22권 제 4호, pp.779~789