

타이타늄 합금의 군사적 응용



許 善 茂
國科硏 책임연구원
공학박사



沈 仁 玉
國科硏 책임연구원
공학박사



千 昌 煥
國科硏 책임연구원
공학박사

“

설계자에게는 타이타늄
합금과 PMCS 모두 경량화 수단을
제공하지만 타이타늄쪽의 가격이 더
효과적이며 획득 절차가 더 완전하게
개발되어 있다. 지난 수년동안 전투차량에서의
타이타늄 사용이 증가했으며 이와 같은 추세는
계속되리라는 전망이다. 모든 지상용 차량
특히 M1 에이브람스 주력전차의 중량을
경량화 시키려는 끊임 없는 긴박한
소요가 있어 왔다. 타이타늄 합금은 앞에서
언급한 것처럼 특성의 고유한 조합 때문에
생존성을 유지시키면서 충분한 경량화를
달성할 수 있는 가장 경쟁력
있는 비용을 제공한다

”

처

음으로 1947년 미국에서 공업적인 생산이
시작된 타이타늄 소재는 산화성 분위기 및
환원성 분위기에서 내식성이 우수하다.

특히 $-200^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위에서 어떤 공
업용 합금보다 비강도(강도/비중)가 우수(P.55 아
래 그림)하여 무기체계 소재로 매우 적합한 특성을
갖추고 있다. 타이타늄 밀도는 강(steel)의 약 60%
에 해당된다. 타이타늄의 가격은 스테인레스강의
1.3배이고 Modulus는 강의 55%에 해당되며 인체를
포함한 어떠한 환경에서도 스테인레스강보다 내식
성이 훨씬 양호하다.

타이타늄은 표준화된 기술로 주조와 단조 가공이
가능하며, 인베스트먼트 주조 방법을 적용할 경우
통상적인 단조나 가공품보다 더 경제적이다.

Why titanium?

Specific strength	Elevated temperature Room temperature
Anti-corrosion	Chemical anticorrosion Electro-chemical anticorrosion Anti-sea water Anti-sea wind Anti-weather Anti-oxidation
Surface (Recent)	Bio-compatibility Coloring by anodizing Non-dissolution of metallic ion Easy peeling off small sea animals Good snow slip
Other (Future)	Low thermal expansion Vibration Out gas Low values in Young's modulus Magnetic insensitivity

타이타늄은 분말야금법으로도 제조될 수 있으나 이 경우 가격은 조금 상승될 수 있는 반면 물성과 공정개선이 가능하다. 타이타늄은 용접, 브레이징, 접착, 확산 접합 등 모든 방법으로 접합이 가능하고 기계 가공도 용이하다.¹⁾

타이타늄은 광범위한 형태나 모양으로 생산이 가능하나 높은 화학 반응성과 높은 용접 등으로 상업

COMPARISON OF LIGHT METALS³⁾

Feature	Aluminum	Titanium	Magnesium
Price	+	- -	0/-
Mechanical Properties	+	++	-/0
Corrosion Behavior	+	++	-/0
Processability	0	- -	+
Fabricability	+	- -	-
Knowledge Base	++	+	-

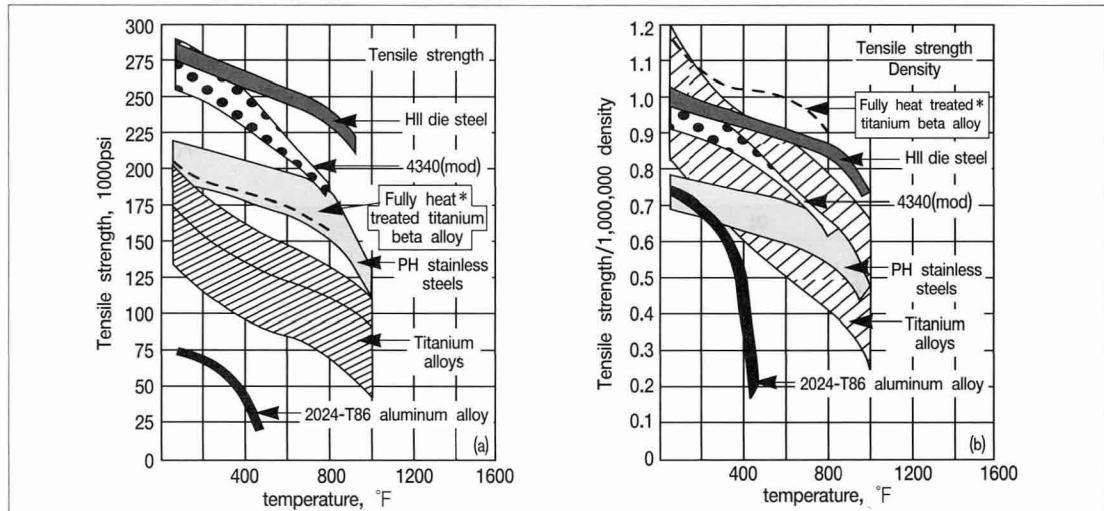
+ Positive - Negative 0 Neutral

적인 활용의 어려움도 있다. 왼쪽에 타이타늄이 매력적이게 된 이유를 정리하였다.

타이타늄의 가격, 특성, 제작성 등에 대해 위의 표에 알루미늄, 마그네슘과 같은 경금속과의 비교가 나와 있다. 타이타늄이 갖는 여러 매력적인 면에도 불구하고 타 금속재료에 비해 가격이 비싸기 때문에, P.56 상단의 표에서 보는 바와 같이 알루미늄, 강만큼 광범위하게 사용되지는 않고 있다.

P.56에 타이타늄 합금의 용도를 정리하였다. P.56의 그래프에 1990년도 타이타늄 스폰지 생산 점유율을 표시하였는 바, 1996년 현재 러시아 타이타늄 생산량은 구 소련의 40%정도로 감소되었고 이는 척당 1백만~6백만 파운드(450톤~2700톤)가 소요되는

대표적인 강, AA2024A-T86합금과 타이타늄 합금의 강도와 비강도



(Metal Handbook 8th Edition Vol.1 p.525)

Projected Light Metals Shipments 1997(Metric Tons)³⁾

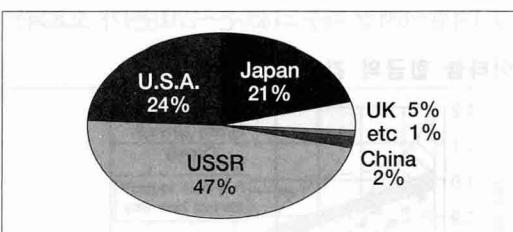
Metal	Estimate $\times 10^3$ *
Titanium	50
Magnesium	320
Aluminum	25,000
Steel	700,000

* World Totals, $\times 10^3$, Courtesy B. Clow, IMA

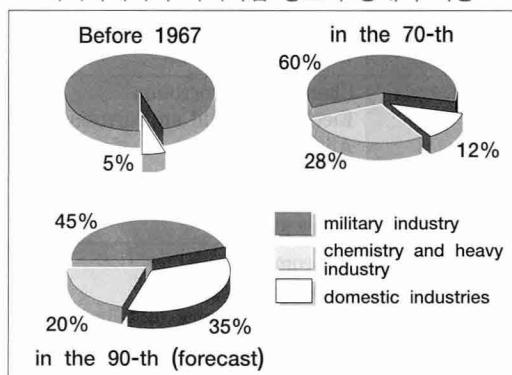
Alfa 금 잠수함 건조와 관계 있는 것으로 알려졌다.⁴⁾ 이는 오른쪽의 그래프에서도 군사적 용도의 비중이 적어지고 있음을 통해 간접적으로 알 수 있다. 그러나 전 세계적으로는 '90년 구 소련의 몰락과 함께 감소세를 보이던 타이타늄 사용량이 '93년부터 서서히 증가하고 있으며 이와 같은 신장세, 특히 과거 2~3년간의 증가세는 주로 상용항공기와 골프 클럽의 수요 증가(P.57 위의 그림)에서 비롯되고 있다.

이 글에서는 타이타늄의 특성에 관하여 간략하게 고찰한 후 지상, 해상 및 수중 그리고 우주 항공분야에서의 타이타늄 및 타이타늄 합금이 왜 어떤 이유로 어떠한 무기체계에 적용되고 또 적용될 수 있는가를 간략히 소개하였다.

1990년도 타이타늄 스폰지 생산 점유율*



러시아에서의 타이타늄 용도의 상대적 비중*



타이타늄 및 타이타늄 합금의 특성

• 구조

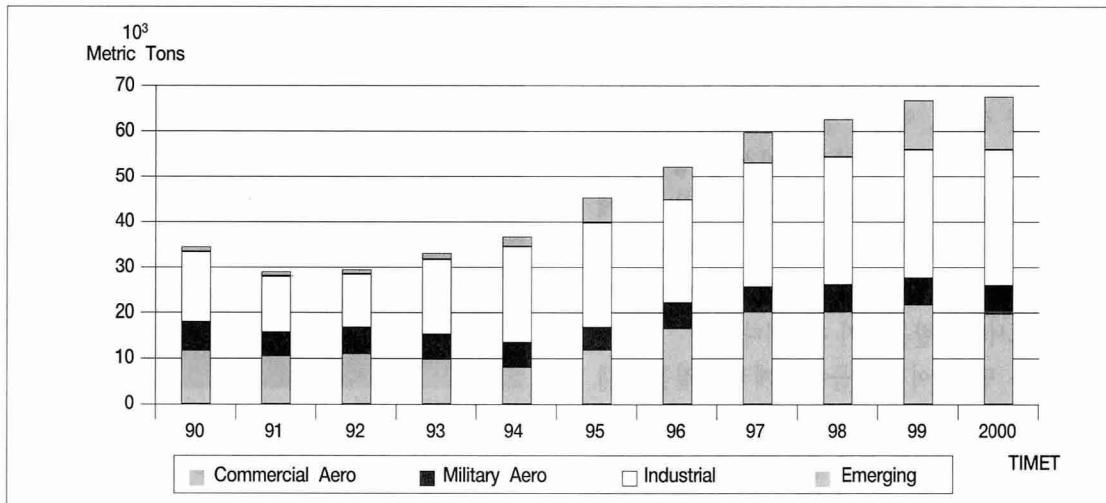
타이타늄은 2가지의 결정 구조로 이루어져 있다. 하나는 체심입방격자(BCC), 또 다른 하나는 조밀육방격자(HCP)구조이다. 합금원소 첨가로 저온에서 입방격자 조직으로 존재하도록 하지 않는한 입방 조직은 고온에서만 존재한다(타이타늄의 용융점은 1660°C인 반면 타이타늄 합금은 약 538°C에서 사용된다).

타이타늄의 2가지 결정조직은 통상 α (조밀 육방) 및 β (입방)로 불리우며, 두 조직을 모두 갖는 α 및 β 조직과 함께 타이타늄 합금은 $\alpha, \alpha+\beta, \beta$ 로 구분한다.

P.57 아래의 그림에 타이타늄에 합금 원소 첨가시 구조 및 특성에 어떤 영향을 미치는지 알기 쉽게 요

타이타늄의 용도

구 분	분 야	용 도
군 수 용	육상	전차, 장갑차, 트럭, 총포, 탄피, 신관부품 등
	해상 및 수중	잠수함, 구축함, 항공모함 등
	유도 항공	전투기, 전폭기, 엔진, 유도무기 등
민 수 용	항공 우주	엔진압축기, 날개, 표면구조품, 블랙박스 소재 등
	화학 공장	반응용기, 배관, 열교환기 등
	발전 설비	압축기 날개 및 샤프트, 열교환기 등
	석유 화학	시추선 천공부품
	의료	의료기기, 인공관절 등
	스포츠 등	테니스라켓, 골프크럽, 안경, 악세서리 등

World Mill Product Shipment Trend⁴⁾

야되어 있으며, 각 경우 대표적인 합금성분도 나타내었다.

순수 타이타늄은 α 조직이다. 합금원소를 첨가하면 타이타늄 합금의 가능한 미세조직의 범위를 형성시

켜주게 되며, $\alpha+\beta$ 합금을 α 쪽에서 여러 성분을 변화시킬 때 준 α 를 형성하게 되며, 똑같이 β 쪽에서도 준 β 를 형성시켜 준다. β 조직은 통상 준 안정(metastable) β 를 이룬다.

타이타늄 합금 원소의 효과¹⁾

α 안정화 원소

aluminum
oxygen
nitrogen

β 안정화 원소

molybdenum
iron
vanadium
chromium
manganese

α 안정화 원소량을 증대시 α 상 증가

β 안정화 원소량을 증대시 β 상 증가

α 조직	준 α (약간의 β)	$\alpha+\beta$ 조직			준 β (약간의 α)	β 조직
순수Ti	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-
Ti- 5Al-	5Al- 6Sn-	6Al- 2Sn-	6Al- 4V	6Al- 2Sn-	8Mn	8Mo- 8V-
2.5Sn	2Zr-	4Zr-	2Sn	4Zr-		6Zr-
1Mo- 0.2Si	2Mo		6Mo		2Fe- 3Al	4.5Sn
	Ti- 8Al- 1Mo 1V				Ti- 13V- 11Cr- 3Al	
						밀도 증가
						열처리 효과 증가
						단시간 강도 증대
						크립 강도 증대
						스트레이인 레이트 민감도 증대
						용접성 증대
						생산성 증대

• 타이타늄 및 타이타늄 합금의 특성

순수 타이타늄과 α 및 준 α 합금은 타이타늄 합금 중 내식성과 용접성이 가장 좋다. 보통 순수 타이타늄은 합금 상태로 약간의 산소를 포함하고 있으며 순수 타이타늄의 강도는 산소와 질소 등 침입형 원소에 의해 영향을 받게 된다. α 합금은 통상 고온에서 내산화성에 기여하는 Al을 많이 함유하고 있다 ($\alpha+\beta$ 합금도 Al을 많이 함유하고 있으나 이는 α 안정화 원소로서의 역할을 하기 위함이다).

α 합금은 단일상이기 때문에 기계적 성질을 증대시키기 위한 열처리가 불가능하나 합금원소를 첨가할 경우에는 $\alpha+\beta$ 상의 영역 온도범위에서 열처리를 하여 각상의 분율을 변화시킴으로써 기계적 성질을 변화시킬 수 있다.

두상이 존재함으로써 조직의 미세화가 가능하고, 일정한 양의 β 상을 낮은 온도에서도 유지시킴으로써, 단조나 용체화 온도로부터 냉각후 시효를 통한 상 변태로 최적의 기계적 성질을 갖는 미세 조직으로 제어 할 수 있다. $\alpha+\beta$ 합금은 적절한 처리를 통해 강도와 인성을 동시에 갖도록 해줄 수 있으며 α 나 β 합금보다 일반적으로 강도가 더 높다.

β 합금은 준안정 상태에 있으며 평형 상태로 변태하려는 경향을 갖고 있다. β 조직의 고유한 강도와 열처리를 통한 α 나 다른 상의 석출로 인한 강도 증가로 β 합금은 강도를 증가시킬 수 있다.

β 조직을 갖게 됨으로써 얻는 가장 큰 이점은 육방격자 조직(α 나 $\alpha+\beta$)에 비해 성형성이 현저히 양호해 진다는 것이다.

타이타늄 방탄재 및 지상장비에의 적용

• 방탄 타이타늄 합금

일반적으로 최상의 방탄재는 최고의 경도값을 가지면서도 취성을 나타내지 않는 것이다. 1950년대 말 타이타늄 방탄재가 개발중이었을때, 시험판재가



M1 에이브람스 전차

방탄시험시 균열이 발생되지 않게 하는 일이 어려웠다. 이는 침입형 탄소, 수소, 산소 및 질소에 의한 탄화물, 수화물, 산화물 및 질화물 등 금속간 화합물의 석출에 기인한 것으로 이에 대응하기 위해서 mill-annealed 상태에서 超低 侵入原子(ELI : Extra Low Interstitials)급의 장갑재(MIL-A-46077ELI)를 규정하게 된 것이다. 원래의 규격이 공표되고 난 후 40년 동안 침입형 원자를 제거하는데 괄목할만한 진보가 이루어졌다. 현재 탄소, 수소 및 질소를 낮은 수준으로 유지하는 것은 쉬워졌다. 그러나 산소는 광석과 대기 중에 존재하기 때문에 지금까지도 어려웠고 앞으로도 어려울 것이며, 가공, 열처리 동안 타이타늄과 반응할 것이다.

또한 순(CP) 타이타늄 합금에서 산소가 강화제로 사용되며 스크랩 안에도 존재한다. 침입형 원자의 방탄성능에 미치는 영향은 부가적이기 때문에 산소 수준을 다소 완화시켜, 다른 침입형 원자를 낮게 유지시킴으로써 비용을 줄일 수 있다.

이렇게 되면 좀 낮은 급의 스폰지나 스크랩 비율을 높여 사용 비용을 줄일 수 있다.⁹⁾ P.59 위의 표에 기존의 鋼(RHA), 알루미늄 및 타이타늄 장갑재의 특성을 비교하였다. 여기에서 질량효율(Em : Mass Efficiency)은 RHA(균질 압연 장갑판재) 단위 면적, 단위 두께당 중량을 이와 동일한 방

강, 알루미늄 및 타이타늄 장갑재의 특성⁴⁾

장갑재 특 성	RHA MIL-A-12560	AA5083 MIL-A-46026	Ti-6Al-4V MIL-A-46077
인장강도(MPa)	1,170	350	970
밀도(g/cm ³)	7.86	2.70	4.50
면밀도(g/cm ³ /cm)	7.83	2.65	4.41
비강도*(MPa·cm ³ /g)	150(1.00)	130(0.87)	220(1.47)
질량효율**	1	1.0~1.2	1.5
공간효율***	1	0.3~0.4	0.9

* 비강도=인장강도/밀도, ()의 숫자는 RHA를 1로 할 때 상대적인 값이다.

** 질량효율(Em=Mass Efficiency)≡RHA 단위 면적, 단위 두께 당 중량/동일 방호 한계속도(V⁵⁰)를 갖는 해당재료의 단위면적 당 중량

*** 공간효율=동일 위협에 대해 이를 막을 수 있는 RHA 두께를 해당재료 두께로 나눈 값

호한계 속도(V⁵⁰=관통 확률이 50%인 충격속도)를 갖는 해당 재료의 단위 면적당 중량으로 나눈 값으로 RHA를 1로 한 상대적인 값을 나타내는 것으로 타이타늄의 경우 1.5로 RHA에 비해 우수한 방호성능을 갖는 것을 알 수 있다.

이는 타이타늄 합금 방탄재의 비강도(인장강도/밀도)값(RHA의 1.47배)과 함께 방탄 구조로서의 타이타늄 합금재의 상대적인 우수성을 나타내는 척도라 할 수 있다. 또한 타이타늄 합금은 RHA, AA 방탄재 등에 비해서 아주 우수한 내식성을 갖고 있기 때문에 운용유지비 측면에서도 RHA나 AA보다 유리하다고 볼 수 있다.

한편, 전투차량 설계자에게는 성능개량과 상충하는 대장갑 위협에 대응하여 증대된 방호력 요구때문에 항상 중량문제가 최대의 골칫거리로 되어 있다. 지상 전투차량 중량은 지난 10년 전 대비 15~20% 상승되었다. 예컨대 M1 에이브람스 주력 전차는 54톤에서 64톤으로 중량이 증가되었다. 중량 증가는 항상 기동력의 저하를 초래하고, 이에 따른 구동 및 주행장치의 성능개량을 초래하는 악순환을 거듭하는 것이 현실이다.

따라서 이와 같은 경향이 지속된다면 2000년에는 기동성은 물론 수송성, 부교통과 능력 및 운용성에 심각하게 영향을 줄 정도로 중량이 증가될 것이다. 이에 대처하기 위하여 美 육군 TACOM은 타이

타늄 합금과 세라믹 타일 및 폴리머 기지 복합재료(PMCS)와 같은 경량재료 대안을 평가하고 있는 바, 이 2가지만이 최근의 경량화 장갑 구조용 대안의 실용성 있는 가능성들이다.¹¹⁾

에이브람스 전차의 중량증가¹⁰⁾

연도	차량	중량(톤)
1980	M1	54.4
1984	M1IP	55.3
1988	M1A1	58.9
1990	M1A2	63.1

타이타늄 합금은 RHA와 AA와의 비교시(위의 표 참조) 앞에서 언급한 바와 같이 광범위한 탄도 위협은 물론 다중탄도 위협(Multihit ballistic capability)에 대하여 높은 질량효율을 갖고 있으며, 추가적인 부가장갑(Applique armor)이 불필요하다. 또한 높은 비강도와 아주 좋은 내식성을 갖고 있어 정비유지 비용이 저렴하다.

타이타늄 합금은 비록 장갑재 부분에 있어 보호는 있지만, 생산과 리사이클링(저가 타이타늄을 위해 필요) 방법이 잘 확립되어 있다.

한편 PMCS는 포탄파편에 대한 높은 질량 효율 등 장점도 있지만 타이타늄에 비해 생산가가 높으며 전장 손상 측정(비파괴 시험) 능력이 잘 개발되어 있지 않고, 최초 탄도 공격에 대하여 구조 변화로 인해 다중탄도 방호능과 차량구조물의 하중지탱



브래들리 장갑차(BRADLEY AFV)

능력이 손상될 가능성이 있다. 또한 차량 내부 화재나 화염의 위험성이 있으며, 상업적 생산과 리사이클링 방법이 아직 확립되어 있지 않은 단점이 있다.

설계자에게는 타이타늄 합금과 PMCS 모두 경량화 수단을 제공하지만 타이타늄쪽의 가격이 더 효과적이며 획득 절차가 더 완전하게 개발되어 있다.

지난 수년동안 전투차량에서의 타이타늄 사용이 증가했으며 이와 같은 추세는 계속되리라는 전망이다. 모든 지상용 차량 특히 M1 에이브람스 주력전

차의 중량을 경량화 시키려는 끊임 없는 진박한 소요가 있어 왔다(P.59의 표 참조).

최근의 鋼으로 만든 포탑, 동체 및 현수 장치는 M1 중량의 70%를 점유하지만 비용은 단지 20%에 해당된다. 따라서 더 가볍고 더 고가의 장갑재는 완성 체계의 값에 작은 영향 밖에는 주지 않는다. 타이타늄 합금은 앞에서 언급한 것처럼 특성의 고유한 조합 때문에 생존성을 유지시켜면서 충분한 경량화를 달성할 수 있는 가장 경쟁력 있는 비용을 제공한다.

P.59 위의 표를 보면 RHA를 타이타늄 장갑으로 교체시 차량의 생존성을 유지시켜 주면서 30~40%의 경량화가 가능하다. 이러한 점 때문에 美 육군에서는 기존의 鋼장갑(RHA)을 타이타늄 장갑으로 교체하여 전투차량의 중량을 약 30~40% 경량화 시키는 동시에 내식성을 부여하고, 2000년까지 기존 대비 전투차량 차체 33% 경량화 및 포탑 24% 경량화 등을 통해 2006년까지 전체 전투차량 중량의 33%를 경량화시킨다는 계획(FY 1998)을 갖고 있으며 이를 위해 가격 저감화(목표15\$/kg) 연구도 함께 수행하고 있다.^[12]

방탄 타이타늄 규격 종류

종 류		MIL-A-46077, Ti-6Al-4V				MIL-T-9047J
적 요		class 1	class2	class3	class4	AB-1(Ti-6Al-4V)
melting 방법		VAR	E.B. Hearth Melting	E.B. Hearth Melting	future armors	final melt: VAR (중간 melt: 제한없음)
화학 성분 %	oxygen carbon nitrogen hydrogen Al V Fe Ti 기타(각각/총)	0.14max 0.04max 0.02max 0.0125max 5.50~6.50 3.50~4.50 0.25max 나 머 지 0.10max/0.40max	0.20max 0.08max 0.05max 0.0150max 5.50~6.75 좌 동 좌 동 0.30max 나 머 지 좌 동	0.30max 0.08max 0.05max 0.0150max 5.50~6.75 좌 동 좌 동 0.30max 나 머 지 좌 동	0.30max 0.08max 0.05max 0.0150max blank blank blank blank blank	0.20max 0.08max 0.05max 0.0125max(100ppm max*) 5.50~6.75 3.50~4.50 0.30max 나 머 지 (-/0.40max)
기계적 성질	Y.S.(ksi) (0.2% offset) T.S.(ksi) Elong.(%)	110min 120min 10min	110min 120min 6min	110min 120min 6min	110min 120min 6min	120min 130min 10min
방탄성능	동 일	동 일	동 일	동 일	동 일	classified

* 브래들리 장갑차 해치 경우

• 방탄 타이타늄 합금 규격

장갑에 적용 가능한 군사규격엔 MIL-A-46077과 MIL-T-9046 2가지가 있다. 전자는 최근까지만 해도 단지 ELI(Extra Low Interstitial)급 Ti-6Al-4V 만 규정한 장갑재 규격이다. 이 규격서는 특별히 美 육군용으로 개발된 최초 규격이며 2인치 두께까지의 판재에 대해서 최소 방탄성능 표가 포함되어 있다.

Ballistic Test Plate Sizes and Corresponding Test Projectiles*

Thickness Ranges(inches)	Ballistic Test Projectile
0.250 to 0.615, excl.	Cal. .30 AP M2
0.615 to 1.575, excl.	20-mm FSP**
1.575 to 1.950, excl.	14.5-mm API B32
1.950 to 4.000	20-mm API-T M602

*5인치 두께 72인치×72인치 타이타늄 방탄재는 90mm(M318A1)까지 시험, 동일한 Areal density 를 갖는 RHA에 비해 더 좋은 방호성능을 보여준다. (ORDP 20~170 31. DEC. 1961).

**FSP:Fragment Simulating Projectile

최근에 P.60 아래의 표에서 보는 바와 같이 규격을 확장시켜 4인치 두께까지 4종을 포함하게 되었다. 1종은 이전에 규정된 ELI급이며, 2종, 3종은 점차로 산소함량을 증가시킨 것이다. Ti-6Al-4V 3종류에 대해서 여러 가지 산소 수준을 포함시킨 것은 높은 비율의 스크랩이나 리사이클링 재료를 써서 단일 용융(예, electron-beam hearth melting)으로 저가합금을 적용하기 위함이다. 4종에 대해서는 향후 개발될 장갑재를 위해 비워둔 것이다.

MIL-T-9046은 항공기용급 타이타늄 합금용으로 개발되었으며 모든 표준급을 망라한다. 여기에는 어떠한 방탄성능 요구사항도 없다. 이 규격에서 AB-1 종은 브래들리 전투차량 Commander Hatch와 같은 장갑재료로 사용되고 있다. 이것이 0.20% max 산소를 함유하는 Ti-6Al-4V이며 MIL-A-46077, 2종과 동일하다. Ti-6Al-4V는 종종 STA(Solution Treated and Aged)상태로 사용된다. 그러나 연구에 의하면 최고의 방탄성은 소둔처리 상태의 판재에서 얻을 수 있다. 899°C의 소둔 온도가 1종 재료의 최

적 방탄성을 나타낸다는 것이 발견되었다.¹³⁾

MIL-A-46077은 P.60의 표처럼 최소 기계적 성질을 만족시켜야 된다. MIL-A-46077의 모두 4가지 class는 동일한 최저 방탄성을 만족시켜야 되며 두께의 함수로 규격에 나와 있다. 탄착 각도는 0° (판에 수직)이며 여러 가지 두께에 대해 사용될 탄은 왼쪽 표에 나와 있다. (다음호에 계속)

참 고 자 료

1. M. J. Donachie, Jr. 「Titanium A Technical Guide」 ASM International, 1988.
2. Metal Handbook 8th Ed. Vol.1, p.525.
3. F.H. Froes, Light Metal Age, Feb. 1996, p.70.
4. F.H. Froes, P.G. Allen and M. Niinomi, 「Non-Aerospace Applications of Titanium」, The Minerals, Metals & Materials Society, 1998, p.5.
5. 정봉수역, 병기공학 편람, Rheinmetall사, AMDC-1-81000-1, 국방과학연구소, 1980, 11. 27, p.297.
6. 혀선무, 심인옥, 천창환, 제6회 지상무기체계 발전 세미나 논문집, 국방과학연구소, 육군교육사령부, 한국 방위산업진흥회, 한국군사과학기술학회, 1998. 9. 29, pp.211~230.
7. Wells, M.G.H., et al. 「Metallic Materials for Lightweight Application」, Proceedings of the 40th Sagamore Army Materials Research Conference 30 August~2 September 1993, Plymouth, Ma.
8. Titanium '92 Science and Technology, Vol. 1 Ed. by F.H. Froes and I Caplan, The Minerals, Metals & Materials Society, 1993.
9. Wells, M.G.H., et al. 「Titanium Applications and R&D for Army Ground Systems」 in F.H. Froes, P.G. Allen and M. Niinomi, 「Non-Aerospace Applications of Titanium」, The Minerals, Metals & Materials Society, 1998, pp.289~296.
10. 혀선무, 심인옥, 천창환, 제5회 지상무기체계 발전세미나 논문집, 국방과학연구소, 육군교육사령부, 한국 방위산업진흥회, 1997. 11. 21, p.97.
11. J.S. Montgomery, M.G.H. Wells, B. Roopchand, and J.W. Ogilvy, JOM, May, 1997, p.45.
12. (美)Defense Technology Area Plan(FY1998), U.S. DoD, May 1997.
13. M. Burkins and W. Love, 16th Inter. Symp. on Ballistics Sanfrancisco, CA Sept. 23-27 1996.