

論文

세라믹스의 물리/기계적 물성과 방탄물성과의 상관관계 연구

김철수^{*+}, 이형복^{*}**The relation between physical/mechanical properties and ballistic properties in several engineering ceramics**Cheol-soo Kim^{*+}, Hyung-Bock Lee^{*}**ABSTRACT**

In this study, we analyzed the relation between physical/mechanical properties and ballistic properties for several engineering ceramics that were expected to use as armor material. After physical/mechanical measurement, we measured ballistic properties about KE(Kinetic Energy, L/D=10.7, tungsten heavy alloy) and HEAT(High Explosive Anti-Tank, K215) projectiles. Increasing Young's modulus/density, hardness/density and flexural strength/density ratios, ballistic properties were generally increased. Especially it appeared that the ballistic property about KE projectile was lineally increased, as HEL/density ratio increased.

초 록

본 연구에서는 방탄재료로 활용 가능할 것으로 예상되는 여러 구조용 세라믹스의 물리/기계적 물성과 방탄물성과의 상호관성을 분석하였다. 물리/기계적 물성을 측정후 30mm 고체추진포에서 10.7의 L/D비를 갖는 텅스텐 긴 관통자를 비행시켜 운동에너지(KE)탄에 대한 방탄물성을 측정하였으며, K215 자탄을 기폭시켜 성형작약(HEAT)탄에 대한 방탄물성을 측정하였다. 영률/밀도비, 경도/밀도비 및 꺾임강도/밀도비가 증가할수록 방탄물성이 대체적으로 증가하는 경향을 보였으며, 특히 HEL(Hugoniot Elastic Limit)/밀도비가 증가함에 따라 KE탄에 대한 방탄물성이 선형적으로 증가하는 현상을 나타내었다.

Key Words : 방탄물성(Ballistic property), 복합 재료(Composite material), HEAT 탄(HEAT projectile), KE 탄(KE projectile)

1. 서 론

세라믹스는 낮은 밀도와 인성에도 불구하고 높은 경도와 압축강도를 갖는 특징으로 인해 방탄재료를 비롯한 구조용 재료로 적용하기 위한 연구가 되어 왔다. 그러나 운동에너지 탄이나 성형작약탄 제트의 세라믹스 관통 메커니즘은 아직 명확하게 규명되지 않았으며, 세라믹스의 미시적/거시적 특성이 어떻게 방탄물성에 영향을 미치는지도 구체적으로 알려져 있지 않다. 특히 재료의 잘 알려져 있는 물리/기계적 물성만으로 방탄

물성을 예상하기는 매우 어렵다.

경도의 경우 금속계 방탄재료에서는 방탄물성과 거의 선형적으로 비례하지만[1] 세라믹계 방탄재료의 경우는 명확하지 않다. 또한 방탄물성에 대한 포아송비 및 영률의 영향에 대해서는 명확히 알려져 있지 않다.

세라믹스의 방탄물성에 대한 HEL(Hugoniot Elastic Limit)의 영향은 상당히 알려져 있으며[2] 그 배경은 다음과 같다. 성형작약탄 제트가 취성재료에 침투할 때 제트에 의해 발생된 충격압력에 의해 고체재료는 유체처럼 거동하는 영역으로 들

*+ 명지대학교 신소재공학과 교신전자(E-mail:csookim007@yahoo.co.kr)

* 명지대학교 신소재공학과

어간다. 이 한계를 유고니어 탄성한계(HEL)라고 부른다. 고체는 HEL 이하의 영역에서는 본래의 강도(압축, 인장, 전단)를 발휘하지만, 그 이상의 영역에서는 본래의 강도를 발휘하지 못한다.

즉, 성형작약탄 제트에 대한 취성재료의 방탄물성은 본래의 강도보다는 본래의 강도가 어느 압력까지 발휘될 수 있는 각종 고체가 유체처럼 거동하는 HEL이 얼마인가가 중요하게 된다.[3] 또한 세라믹의 동적파괴 균열전파속도는 2-3 km/sec이며 성형작약탄 제트 침투속도가 3~4km/sec 범위의 초고속임으로 제트 침투가 시편 내부의 균열전파속도보다 빠르거나 동시에 일어날 수 있기 때문에 균열에 지배받는 강도가 아닌 이론강도(원자간의 결합력)에 의하여 영향을 받을 것으로 생각할 수 있다.[4]

반면에 운동에너지 탄자의 침투속도는 약 0.8km/sec로 운동에너지 탄자의 충돌에 의해 발생하는 균열이 탄자 침투보다 먼저 진행된다.[5] 따라서 운동에너지탄에 대한 방탄물성은 성형작약탄에 비해 이론강도보다는 강도에 영향을 더 받게 될 것이다.

취성재료의 인장강도는 금속에 비해 매우 낮으나 이론강도는 높은 특징이 있다. 취성재료는 압축강도가 높고, HEL 또한 금속(0.5~1GPa)에 비해 6~15GPa로 10배 이상 높다. 따라서 취성재료는 이론강도 및 HEL이 금속에 비해 높기 때문에 인장강도 영향이 적고 이론강도 및 HEL의 영향은 큰 성형작약탄에 대한 방탄물성은 금속보다 높고, 인장강도 영향이 큰 운동에너지탄에 대한 방탄물성은 성형작약탄에 대한 방탄물성에 비하여 낮다고 할 수 있다.

그러므로 물리/기계적 물성들이 세라믹스의 방탄물성에 미치는 영향은 각기 다르게 나타날 것이며, 본 연구에서는 이러한 취성재료의 물리/기계적 물성과 방탄물성과의 상관관계를 규명하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 원리

본 연구에서는 Table 1과 같이 조성이 다른 3종류의 Al₂O₃ 계열(이후 A계열로 표기)과 제조방법이 다른 3종류의 SiC계열(이후 B계열로 표기), 그리고 TiB₂, B₄C(이후 기타계열로 표기)를 사용하였다.

2.2 물리/기계적 물성 측정

2.2.1 물리적 특성 측정

재료의 탄성계수를 측정하기 위하여 먼저 수침법에 의하여 밀도를 측정하였다.[6] 초음파를 사용하여 재료의 횡파와 종파 음속을 측정하였으며, 이를 이용하여 포아송비(Poisson's ratio)와 영률 등을 구하였다.

Table 1 Ceramic specimens

Group	Specimen	Manufacturer
A	85% Al ₂ O ₃ (A8)	Coors
	90% Al ₂ O ₃ (A9)	Coors
	99% Al ₂ O ₃ (A99)	Ceratec
B	reaction-bonded SiC(RS)	Coors
	sintered SiC(SS)	Carborundum
	hot-pressed SiC(HS)	Coors
Etc	hot-pressed TiB ₂ (TB)	Ceradyne
	hot-pressed B ₄ C(HB)	Ceradyne

2.2.2 기계적 물성 측정

경도 및 인성을 측정하기 위해 연마된 세라믹의 표면에 Vickers indentation을 행하였다. 사용된 하중은 1~5kg 으로 각기 달리하였으며 5-10군데 정도 찍은 후 값을 평균했다. 시편에 하중이 잘 전달되도록 5초 정도의 유지시간을 두었다. 경도(H, hardness)와 인성(T, toughness) 계산에 사용된 식은 아래와 같다.[7]

$$H = \frac{P}{2a^2} \tag{1}$$

$$T = 0.016(E/H)^{1/2}(P/c^{3/2}) \tag{2}$$

여기서 H는 경도, T는 인성, P는 가해준 하중, a는 압흔(indentation)자국의 대각선 길이의 절반이고 E는 탄성계수, c는 균열의 크기이다.

적임강도를 구하기 위해 연마한 시편에 대해 4점 적임강도 시험(bending test)을 실시하였다. 적임강도 시험에 사용한 장비는 INSTRON #4206이고 cross head의 속도는 0.5mm/min으로 하였다. 한 시편 당 5-8번 가량의 적임강도 시험을 하였다. 적임강도 계산에는 다음과 같은 식이 사용되었다.

$$\sigma = \frac{3FL-d}{bd^2} \tag{3}$$

여기서 P는 하중, L은 넓은 span의 길이(12.7mm), l은 좁은 span의 길이(6.35mm), b는 bar 시편의 너비, d는 높이이다.

2.3 방탄물성 측정

30mm 고체추진제활강포(SPG: Solid Propellent Gun)와 40mm K215 자탄을 이용하여 운동에너지탄과 성형작약탄에 대한 세라믹 재료의 방탄물성을 측정하였다. 그 상세내용은 본지에 동시 게재되는 “알루미나-실리카계 세라믹 복합체 방탄재료 연구(1)”에 나타내었다.

3. 실험결과 및 분석

본 연구에 사용된 세라믹스 시편의 물리/기계적 물성을 Table 2에 나타내었다. A계열은 Al₂O₃함량이 높아질수록 영률, 경도, HEL이 증가하는 경향을 보인다. Al₂O₃함량이 증가하면 상대적으로 SiO₂보다 Al₂O₃ 함량이 많아지고 영률, 경도, HEL은 Al₂O₃가 SiO₂보다 우수함으로 영률, 경도, HEL이 증가한다. B계열에서는 고온가압소결 SiC(이후 HS로 표기)가 가장 높은 영률과 HEL 값을 갖으며 이는 밀도가 높은 점과 고온가압소결의 특징으로 볼 때 일반적인 결괴이지만, α/β 상의 혼재로 인하여 상압소결 SiC(이후 SS로 표기)보다 낮은 경도를 나타내었다.[9] TiB₂는 측정된 재료 중에서 가장 높은 영률을 나타내었다.

Table 2 Mechanical/physical properties of ceramics[9~10]

Mat.	Density (g/cm ³)	Poisson's ratio	Young's modulus (GPa)	Hardness (GPa)	Flexural Strength (MPa)	Toughness (MPa·m ^{1/2})	HEL (GPa)
A8	3.439	0.230	235.9	9.2	266	3.23	6.0
A9	3.592	0.229	278.1	12.8	309	3.19	7.0
A99	3.895	0.225	365.4	15.2	261	3.01	8.2
RS	3.078	0.175	394.5	18.6	440	3.69	8.0
SS	3.166	0.168	439.6	29.1	553	2.46	13.2
HS	3.217	0.174	441.9	27.4	525	3.75	15.0
TB	4.481	0.081	564.2	20.6	293	4.38	13.5
HB	2.503	0.167	456.2	27.3	390	3.66	15.1

Fig. 1은 포아송비/밀도비(물리적 의미는 단위밀도 당 포아송비 즉 비(比)포아송비임)와 방탄물성과의 관계를 나타낸 것이다. 물리/기계적 물성을 밀도로 나누어 표시하는 값은 일반적으로 사용되지 않는 물성 값이지만 방탄물성이 밀도를 나누어 나타내기 때문에 물리/기계적 물성도 밀도 의존성을 배제하기 위해 밀도로 나누었고 밀도를 나누지 않은 경우에 비해 경향성이 뚜렷해 졌다.

Fig. 1에서 보는바와 같이 A계열은 포아송비/밀도비가 높아질수록 KE탄과 HEAT탄 방탄물성이 감소하는 경향을 보이고 있다. B계열은 포아송비/밀도비가 유사하지만 KE탄에 대한 방탄물성은 상당히 감소하는 경향을 보이며, HEAT탄에 대한 방탄물성은 약간 증가하는 경향을 보인다. 기타(TiB₂, B₄C)의 경우 포아송비/밀도비가 높은 B₄C가 TiB₂에 비해 KE탄과 HEAT탄에 대한 방탄물성이 높았다.

방탄물성과 물리/기계적 물성의 상관관계는 매우 낮다. 이유는 방탄물성은 변형속도가 매우 높은 10⁶⁻⁸/sec정도에서의 측정

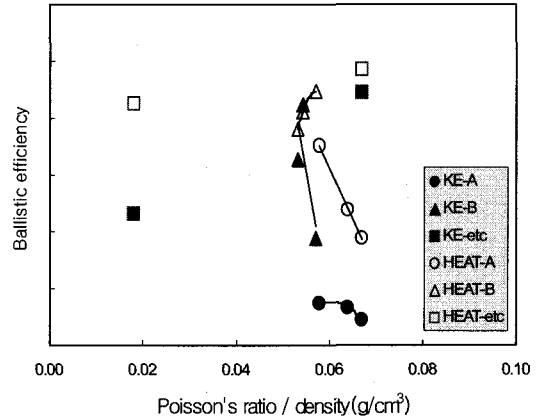


Fig. 1 Relative ballistic property with Poisson's ratio/density ratio.

되는 물성이고, 물리/기계적 물성은 변형속도가 10²/sec 정도에서 측정되는 물성으로 근본적으로 맞지 않기 때문이다. 그러나 재료의 물리/기계적 물성은 잘 알려져 있을 뿐만 아니라 측정하기가 동적물성에 비해 쉽고 또한 제조방법과 미세조직과의 연관성도 잘 알려져 있다. 즉 방탄물성과 물리/기계적 물성의 상관관계를 잘 알게 되면 방탄물성이 좋은 재료의 제조가 용이하게 된다. 그러므로 상관관계가 매우 낮지만 두 물성과의 상관관계를 가능한 한 찾아보고자 하는 것이다.

KE탄에 대한 방탄물성은 일반적으로 압축강도가 높으면 탄에 대한 저항력이 증가하는 경향을 보인다. 그러므로 포아송비가 낮아지면 압축강도는 대체로 높아질 것이므로 방탄물성도 높아질 것으로 기대되며 A계열과 B계열은 잘 일치하고 있다. 그러나 TiB₂, B₄C의 경우는 A계열과 B계열과는 달리 완전히 다른 재료들이므로 이러한 경향이 맞지 않으며, B₄C가 TiB₂에 비해 압축강도/밀도비가 높아 방탄물성이 높을 것으로 추측된다.

HEAT탄에 대한 방탄물성은 압축강도가 높아지면 일차적으로 탄 저항력이 높아 좋아지는 경향을 보이나 재료가 어떻게 파괴되어 수축-팽창을 하는가에 따라 추가적인 영향을 주게 된다. 즉 탄이 도착할 때 강력하게 대항하다가 그 한계를 지나면 많은 부분이 아주 미세하게 부서져 탄 진행방향과 반대방향으로 빠른 속도로 이동(수축-팽창이 많은 재료)하면서 제트를 교란하여야 방탄물성이 높게 된다. Al₂O₃계열은 포아송비/밀도비가 높아지면 압축강도는 낮아지고 HEAT 방탄물성은 탄에 대한 저항효과가 낮아져 감소하고 있다. SiC계열은 포아송비/밀도비가 높아지면 HEAT 방탄물성이 감소하여야 하나 반대로 높아지고 있다. 그 이유는 SiC 입자계면 결합력이 낮아 포아송비/밀도비가 높아지면 탄의 충격에 의해 보다 많은 부분이 부서져 수축-팽창효과가 증가되기 때문으로 추측되지만 명확하지는 않다. TiB₂, B₄C의 경우는 KE의 경우와 같이 그 재료의

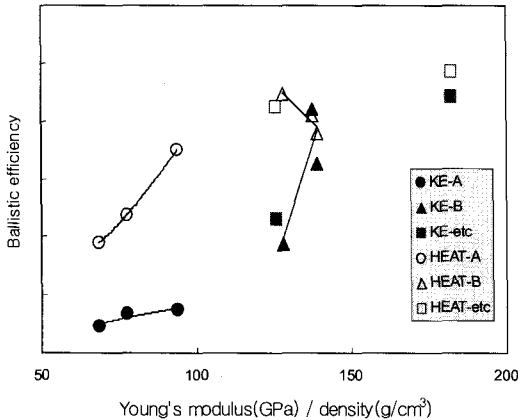


Fig. 2 Relative ballistic property with Young's modulus/density ratio.

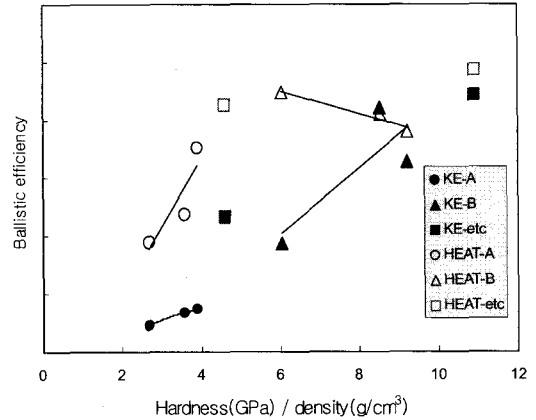


Fig. 3 Relative ballistic property with hardness/density ratio.

고유특성으로 이해되며 수축-팽창효과도 B₄C가 TiB₂보다 높을 것으로 앞의 결과에서 유추할 수 있다.

Fig. 2에 영률/밀도비와 방탄물성과의 관계를 나타내었다. A계열은 영률/밀도비가 높아질수록 KE탄과 HEAT탄에 대한 방탄물성이 증가하는 경향을 보였다. B계열에서는 HEAT탄 방탄물성은 감소하는 경향을 보이며, KE탄 방탄물성은 대체적으로 증가하는 경향[11]을 보였다. 기타의 경우, 영률/밀도비가 높은 B₄C가 TiB₂에 비해 KE탄과 HEAT탄에 대한 방탄물성이 높게 나타났다.

영률/밀도비가 높을수록 압축강도가 높아져 탄에 대한 일차적 저항효과가 높아지고 이로 인해 방탄물성은 높아질 것으로 예측되며 전체적으로 볼 때 세라믹의 영률/밀도비가 높을수록 높은 방탄물성을 나타내는 경향을 보이고 있다. 그러나 B계열의 HEAT 방탄물성은 앞에서 고찰한 바와 같이 SiC 입자경계면 결합력이 낮아 포아송비/밀도비가 높아지면 탄의 충격에 의해 보다 많은 부분이 부서져 수축-팽창효과가 증가되기 때문으로 추측되지만 명확하지는 않다.

Fig. 3은 경도/밀도비와 방탄물성과의 관계를 나타낸 그림이다. A계열은 경도/밀도비가 높아질수록 KE탄과 HEAT탄에 대한 방탄물성이 증가하는 경향을 보였다.[12] B계열에서는 HEAT탄 방탄물성은 감소하는 경향을 보이며, KE탄 방탄물성은 대체적으로 증가하는 경향을 보였다.

기타에서는 경도/밀도비가 높은 B₄C가 TiB₂에 비해 KE탄과 HEAT탄 방탄물성이 높았다. 전반적으로는 영률에서 고찰한 바와 같은 특성인 경도/밀도비가 높아짐에 따라 방탄물성이 향상됨을 볼 수 있다. 그러나 B계열의 HEAT탄에 대한 방탄물성은 영률에서 고찰한 바와 같이 SiC 입자경계면 결합력이 낮아 포아송비/밀도비가 높아지면 탄의 충격에 의해 보다 많은 부분이 부서져 수축-팽창효과가 증가되기 때문으로 추측되지만 명확하지는 않다.

적임강도/밀도비와 방탄물성과의 관계를 Fig. 4에 나타내었다.

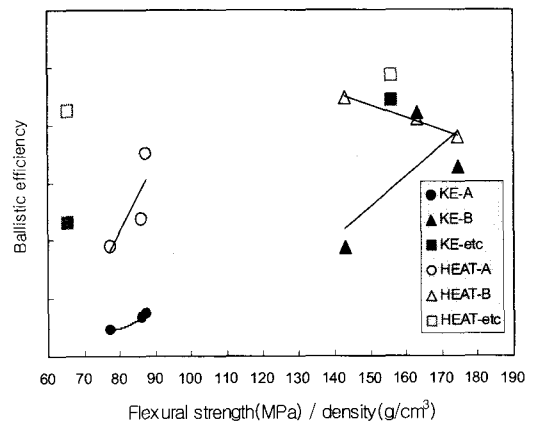


Fig. 4 Relative ballistic property with flexural strength/density ratio.

A계열은 경도와 마찬가지로 적임강도/밀도비가 높아질수록 KE탄과 HEAT탄에 대한 방탄물성이 증가하는 경향을 보였다. B계열에서는 HEAT탄 방탄물성은 감소하는 경향을 보이며, KE탄 방탄물성은 대체적으로 증가하는 경향을 보였다. 기타 재료에서는 적임강도/밀도비가 높은 B₄C가 KE탄과 HEAT탄에 대한 방탄물성이 TiB₂보다 높았다. 전반적으로는 경도에서 고찰한 바와 같은 특성인 적임강도/밀도비가 높아짐에 따라 방탄물성이 향상됨을 볼 수 있다. 그러나 B계열의 HEAT탄에 대한 방탄물성은 포아송비, 영률에서 고찰한 바와 같은 이유로 감소하고 있다.

파괴인성/밀도비와 방탄물성과의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. A계열은 경도, 적임강도와 반대로 파괴인성/밀도비가 높아질수록 KE탄과 HEAT탄에 대한 방탄물성이 감소하는 경향을 보였다. B계열에서는 HEAT탄 방탄물성은 약간 증가하는 경향을 보이며,

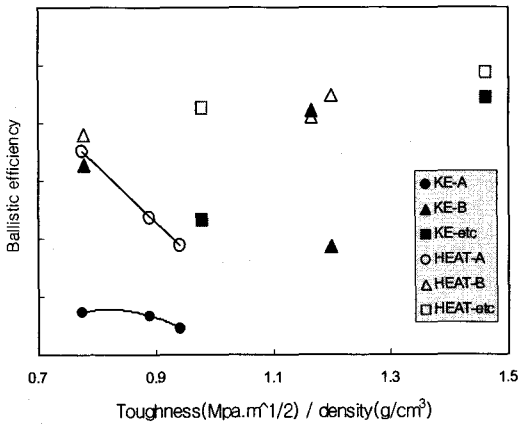


Fig. 5 Relative ballistic property with toughness/density ratio.

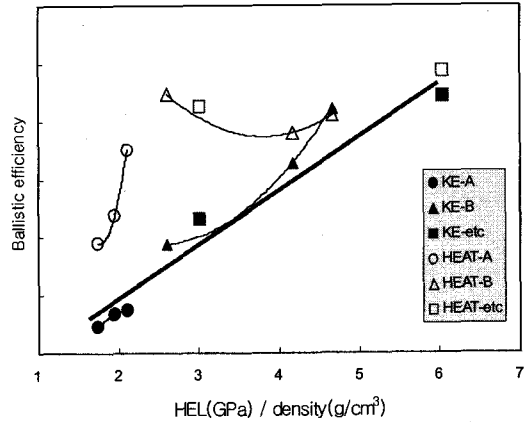


Fig. 6 Relative ballistic property with HEL/density ratio.

KE탄 방탄물성은 경향이 거의 없었다. 기타 재료에서는 파괴인성/밀도비가 높은 B₄C가 KE탄과 HEAT탄에 대한 방탄물성이 TiB₂보다 높았다. 전반적으로는 경도, 꺾임강도와는 다른 경향을 보이며 경향성도 적은편이다. 즉 방탄재료 개발 시 파괴인성은 크게 고려할 요소가 아니다.

HEL/밀도비와 방탄물성과의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. A계열은 HEL/밀도비가 높아질수록 KE탄과 HEAT탄에 대한 방탄물성이 증가하는 경향을 보였다. B계열에서는 HEL/밀도비가 높아질수록 KE탄 방탄물성은 증가하지만, HEAT탄의 경우는 감소하다가 증가하는 경향을 보인다. 기타 재료에서는 HEL/밀도비가 높은 B₄C가 KE탄과 HEAT탄에 대한 방탄물성이 TiB₂보다 높았다. 전반적으로는 HEL/밀도비가 높을수록 방탄물성이 높게 나타남을 알 수 있다. 특히 KE에 대한 방탄물성과 HEL/밀도비의 상관관계는 재료의 종류(A, B, 기타)에 상관없이 거의 선형적으로 비례한다. 이는 KE탄에 방탄재료 개발 시 HEL/밀도비가 높은 재료로 개발하면 된다는 것이며 방탄물성과 HEL/밀도비가 선형적으로 비례한다.

A계열은 Al₂O₃와 그 외 성분(실리카 등)의 혼합정도에 따라 물리/기계적 물성이 다르다. 즉 Al₂O₃양(85%, 90%, 99%)이 많아지면 밀도 대비 영률, 경도, HEL 값이 높아지고 포아송비는 낮아진다. 이는 밀도 대비 물리/기계적 물성이 높아지면(포아송비는 낮아지면) 방탄성능이 향상된다. 결론적으로 Al₂O₃계열은 밀도 대비 물리/기계적 물성이 높은(포아송비는 낮은) 재료가 좋은 방탄재료가 될 것으로 판단된다.

B계열은 주재료가 SiC이며 제조방법(RS, SS, HS)이 다르다. 제조방법의 차이에 의해 물리/기계적 물성이 다르게 나타나며, 대체적으로 RS, SS, HS의 순서로 밀도 대비 영률, 경도, HEL 값이 높아지고 포아송비는 낮아진다. 밀도 대비 물리/기계적 물성이 높아지면(포아송비는 낮아지면) KE탄에 대한 방탄물성은 증가하는 경향을 보이나, HEAT탄에 대한 방탄

물성은 감소하는 경향을 보였다. 그러므로 KE탄과 HEAT탄에 대항하기 위해 사용되는 재료의 개발방향은 다르다는 뜻이다.

기타 재료의 경우, 밀도 대비 물리/기계적 물성이 높은 B₄C가 TiB₂에 비해 KE탄과 HEAT탄에 대한 방탄물성이 높았다.

KE탄과 HEAT탄에 대한 방탄물성을 동시에 고려해 보면, 재료의 물리/기계적 물성이 높을수록(포아송비는 낮을수록) 대체적으로 방탄물성이 향상되었다.

4. 결론

각종 세라믹 방탄재료의 물리/기계적 물성과 KE탄과 HEAT탄에 대한 방탄물성과의 연관성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Al₂O₃계열(85%, 90%, 99% Al₂O₃) 및 B₄C, TiB₂의 밀도 대비 영률, 경도, 꺾임강도, HEL 값이 높아지면 KE탄과 HEAT탄에 대한 방탄물성도 향상되었다.
2. SiC계열(RS, SS, HS)의 영률, 경도, 꺾임강도, HEL 값이 높아지면 KE탄에 대한 방탄물성은 대체로 증가하나, HEAT탄에 대한 방탄물성은 감소하였다.
3. 재료의 종류에 상관없이 밀도 대비 HEL이 높아지면 방탄 물성이 거의 선형적으로 향상되었다.

참고문헌

- 1) J. Awerbuch, S. R. Bodner, "Analysis of the Mechanics of Perforation of Projectiles in Metallic Plates," AD-786282, 1973, pp. 11-14.

- 2) D. A. Shockey, D. R. Curran, R. W. Klopp, L. Seaman, C. H. Kanazawa, "Characterizing and Modeling Penetration of Ceramic Armor," *Final rept.*, AD-A292588, Feb. 1995, pp. 122-126.
- 3) L. A. Glenn, B. Moran, A. S. Kusubov, "Jet penetration in glass," International conference on mechanical and physical behavior of materials under dynamic loading (3rd), *Strasbourg (France)*, Oct. 1991, pp. 14-18.
- 4) 최준홍, 김창욱, 장순남, "초고속 Jet의 취성재료 관통현상", 제10회 지상무기체계발전세미나 논문집, 국방과학연구소, 2002, pp. 126-129.
- 5) J. H. Choi, C. H. Lee, S. N. Chang, S. K. Moon, "Long-Rod Impact Phenomena: Role of Wave Interaction on Crack Propagation", *Int. J. Impact Engng.*, 17, 1995, pp. 195-204.
- 6) ASTM C373-88, "Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products," ASTM
- 7) G. R. Anstis, P. Chantikul, D. B. Marshall, B. R. Lawn, "A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: I. Direct Crack Measurement," *J. Am. Ceram. Soc.*, 64[9], 1981, pp. 533-538.
- 8) T. J. Moynihan, S. Chou, A. Mihalcin, "Application of the Depth-of-Penetration Test Methodology to Characterize Ceramics for Personnel Protection," *Final rept. ARL-TR-2219; ADA376698*, Jan 1998-Aug 1999, pp. 40-43.
- 9) D. G. Kim, S. S. Lee, H. S. Shin, S. N. Chang, C. S. Kim, B. S. Jean, "취성재료의 파괴 거동에 관한 연구," 국방과학연구소 연구보고서 GSDC-411-000582, 2000, pp. 29-34.
- 10) T. J. Holmquist, A. M. Rajendran, D. W. Templeton, K. D. Bishnoi, "A Ceramic Armor Material Database," *TARDEC Technical Report #13754*, 1999, pp. 210-240.
- 11) P. Bartkowski, S. Spletzer, "Porosity Effects on the Elastic Constants of Five Varieties of Silicon Carbide Ceramic," *Final rept.*, ARL-TR-2606;ADA398991, Feb. 1998-Dec. 1999, pp. 36-38.
- 12) W. J. Ferguson, R. W. Rice, "Effect of Microstructure on the Ballistic Performance of Alumina," *Interim rept.*, NRL-MR-2302;AD516995, 1971, pp. 22-27.