

## 탄도 충격을 받는 Steel/Kevlar 혼합복합재 헬멧 수치 시뮬레이션<sup>§</sup>

조종현\* · 이영신\*<sup>†</sup> · 김해란\*

\* 충남대학교 기계설계공학과

### Numerical Simulation of Steel/Kevlar Hybrid Composite Helmet Subjected to Ballistic Impact

Jong Hyun Jo<sup>\*</sup>, Young Shin Lee<sup>\*†</sup> and Hai Lan Jin<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received May 17, 2012 ; Revised July 11, 2012 ; Accepted July 11, 2012)

**Key Words:** Projectile(발사체), Ballistic Resistance(탄도저항), Internal Energy(내부에너지)

**초록:** 본 논문은 AUTODYN-3D 프로그램을 이용한 방탄 헬멧의 탄도충격에 관한 연구를 하였다. 두 가지 유형의 재료가 방탄 헬멧에 사용되었다. Kevlar 및 Steel/Kevlar 혼합복합재 이다. 강구와 7.62 mm 금속 피복탄이 시뮬레이션에서 사용되었다. 시뮬레이션에서 발사체의 변형된 형상과 내부에너지가 계산되었다. 결과는 Steel/Kevlar 헬멧을 관통하기 위해 요구되는 충격속도는 강구와 7.62 mm 금속피복탄에 따라 각각 655 m/s 와 845 m/s 이상이다. 결과로부터 Kevlar 와 Steel/Kevlar 헬멧 사이의 탄도 저항에 큰 차이를 볼 수 있었다. NIJ-STD-0106.01 Type II 헬멧에 대한 시뮬레이션으로 충격 속도 358 m/s 의 7.62 mm 금속피복탄이 사용되었다. 시뮬레이션 결과는 Steel/Kevlar 헬멧이 충격 속도 358 m/s 의 7.62 mm 금속피복탄을 방어할 수 있는 것으로 나타났다.

**Abstract:** In this study, ballistic impact effects on a helmet were investigated using the AUTODYN-3D program. Two types of materials were used for manufacturing the helmet: single Kevlar and Steel/Kevlar hybrid composites. Furthermore, two types of bullets were used in the simulation: steel spherical and 7.62 mm full-jacketed. In the simulation, the shape deformation of the projectile and internal energy were calculated. From the results, impact velocities above 655 m/s and 845 m/s were required to perforate the Steel/Kevlar helmet with steel spherical and 7.62 mm full-jacketed bullets, respectively. The results show that there was a large difference between the ballistic resistance of the Kevlar and Steel/Kevlar helmets. For the simulation on an NIJ-STD-0106.01 Type II helmet, a 7.62 mm full-jacketed bullet with a striking velocity of 358 m/s was used. Simulation results show that the Steel/Kevlar helmet could resist a 7.62 mm full-jacketed bullet traveling at 358 m/s.

#### 1. 서 론

방탄헬멧 설계는 인명 보호적인 측면에서 볼 때 다양한 유형의 발사체가 광범위한 속도를 가지고 충돌하는 경우, 보호물이 손상을 입는지의 판단이 상당한 관심사가 되고 있다.

방탄헬멧의 주목적은 파편방어용뿐만 아니라 직

격탄을 방어하는데 있다. 현재 신형방탄헬멧의 방탄재료로 단일재료인 폴리머 계열을 선호하는데 이는 헬멧의 경량화와 방탄성능을 향상시키기 위함이다. 하지만 군사비용 및 금속제의 방호력 효율을 고려한다면 경량화에는 다소 성능이 떨어지지만 단일 폴리머 재료 대신 혼합복합재의 방탄성능을 평가함으로써 적용 가능성을 확인할 필요가 있다. 방탄헬멧의 손상 정도를 방탄성능으로 표현하며 방탄성능을 나타내는 기준으로 방호탄도한계 속도를 사용한다. 방호성능은 탄의 종류와 형상, 충격속도, 방탄재료의 성질, 규격 등에 따라 결정되지만, 일반적으로 방호성능은 일정한 충격위협에 대한 피해를 양적으로 측정하여 비교할 수 있

<sup>§</sup> 이 논문은 2012년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계 학술대회(2012.5.10-12, 제주 휘닉스아일랜드) 발표논문임

<sup>†</sup> Corresponding Author, [leeys@cnu.ac.kr](mailto:leeys@cnu.ac.kr)

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

다. 이러한 방탄성능 측정은 실제 실험을 통한 검증이 주로 쓰이게 된다. 그러나 관통자의 충돌속도 및 경사, 재질 등 다양한 조건에 대한 방탄성능을 확인하기 위해서는 많은 비용과 시간이 소요되며 측정을 어렵게 하는 단점이 있다. 따라서 Autodyn, LS-Dyna 등 유한 요소법 또는 유한 차분법을 기반으로한 범용프로그램을 이용하여 다양한 조건의 실험을 보완 또는 해석하는 대안으로 활용될 수 있고 이는 설계에 있어서 피드백하여 적용된다.<sup>(1)</sup>

이영신 등은 충격자 형상 및 표적체의 재질변화에 따른 관통이력을 연구하였다. 또한 FEA 코드를 이용하여 율통철헤의 자유낙하를 연구하는 등 충격에 관하여 많은 연구가 이루어 졌다.<sup>(2-4)</sup>

Rosenberg 등은 PMMA 판의 충격과 관통에 대한 연구를 수행하였으며 경사진 충격에서 발생하는 도비현상을 연구하였다. 그들은 스폴링(spalling)이 도비 발생의 지배요인임을 밝혔으며 광범위한 실험 및 수치 연구를 수행하였다.<sup>(5)</sup> 최근에는 Rittel과 Dorogoy 등에 의해 높은 변형률과 구속조건에서 고분자의 기계적 특성이 연구되었다.<sup>(6)</sup> Tham 등은 구형의 발사체, 9 mm FMJ(Full Metal Jacket) 탄두 및 파편 모의탄을 Kevlar 로 제작된 방탄헬멧에 충돌시키는 실험과 FDM 을 이용한 전산모사를 수행하여 그 결과를 비교 분석하였다.<sup>(7)</sup>

본 논문은 11.9 g 강구와 7.62 mm FMJ 일반 탄도 충격에 의한 Kevlar 와 Steel/Kevlar 혼합복합재 헬멧의 방탄성능을 AUTODYN-3D 를 이용하여 비교 및 고찰하였다. 이는 단일재료 사용의 대안으로서 혼합복합재를 사용하여 방탄헬멧의 탄도저항을 평가하는데 있다. 비교 방법으로는 내부에너지 측정 및 탄자 변형으로 방탄성능을 확인하고 NIJ-STD-0106.1 Type 에 부합되는지를 확인하였다.

## 2. KEVLAR 헬멧의 탄도저항

### 2.1 모델링 및 재료상수

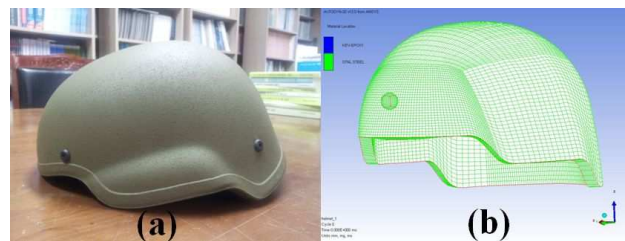
Kevlar 헬멧의 탄도저항 예측은 유한 차분법을 기반으로한 AUTODYN-3D 를 이용하여 전산모사를 수행하고 참고문헌의 실험을 통해 검증하였다. Kevlar 헬멧의 탄도시험은 싱가포르 국립 대학의 충격역학 실험실에서 수행되었고 그 결과와 본 시뮬레이션에서 도출한 결과를 비교 고찰하여 시뮬레이션을 검증하였다.<sup>(7)</sup> 탄도시험은 15 mm 구멍의 가스총으로 직경 14.9 mm 스테인리스 강 구형 발사체를 205 m/s 의 속도로 가격하여 실험되었다.

동일한 실험 조건으로 시뮬레이션을 수행하기 위해 Fig. 1(a)과 같은 실제 단일 Kevlar 방탄헬멧을 구입하여 치수를 측정하고 모델링을 수행한 결과는 Fig. 1(b) 에 보여진다.

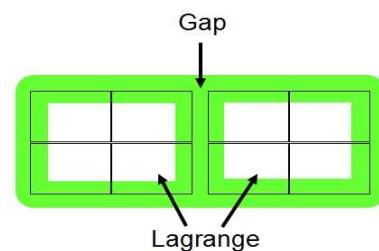
Table 1 은 탄도 충격시뮬레이션에 적용된 Kevlar 재료모델에 대한 상수를 나타낸다. 제시된 재료상수는 탄도 충격에 의한 Kevlar 헬멧의 응답을 나타내는데 사용되며 참고문헌[8]에서 인용되었다.

**Table 1** Input for the material model for the Kevlar in AUTODYN-3D<sup>(8)</sup>

Parameter	Value
Density(g/cm <sup>3</sup> )	1.65
EOS	Ortho
Young modulus 11 (GPa)	17.989
Young modulus 22 (GPa)	17.989
Young modulus 33 (GPa)	1.9480
Poisson ratio 12	0.0800
Poisson ratio 23	0.6980
Poisson ratio 31	0.0756
Shear modulus 12 (GPa)	1.85701
Shear modulus 23 (GPa)	0.22350
Shear modulus 31 (GPa)	0.22350
Strength	Elastic
Shear modulus (GPa)	1.85701
Failure	Material Stress/Strain
Tensile failure strain 11	0.06
Tensile failure strain 22	0.06
Tensile failure strain 33	0.02
Post-failure option	Orthotropic
Residual shear stiffness fraction	0.20
Failed in 11, failure mode	11 only
Failed in 22, failure mode	22 only
Failed in 33, failure mode	33 only
Failed in 12, failure mode	12 & 33 only
Failed in 23, failure mode	23 & 33 only
Failed in 31, failure mode	31 & 33 only



**Fig. 1** Modeling of AUTODYN-3D simulation for helmet



**Fig. 2** The contact detection zone of a surface segment

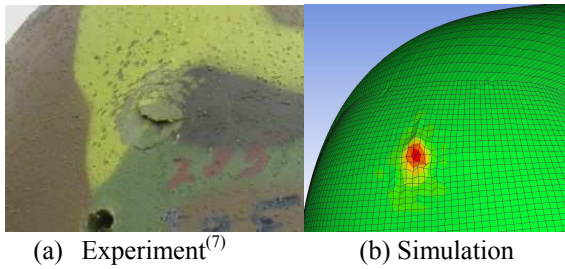


Fig. 3 Indentation is observed in both experiment and simulation



Fig. 6 Steel plate clamped in fixture frame

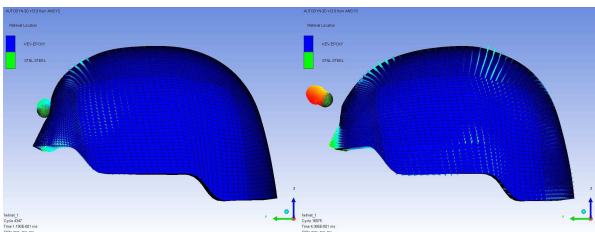


Fig. 4 The direction of movement for projectile in during impact



(a) Deformation : 3.2 mm



(b) Deformation : 6.1 mm

Fig. 7 Rectangle plate deformation by projectile impact (V = 400 m/s)

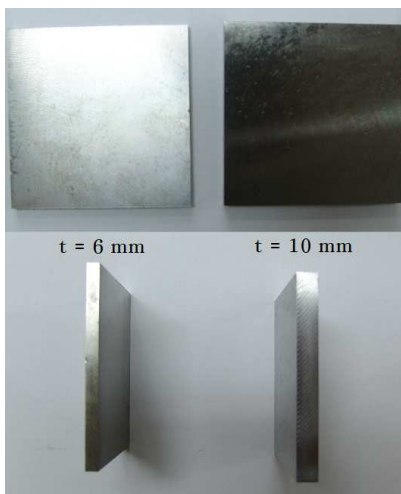


Fig. 5 Impact specimens of steel plate

2.2 해석결과

초기속도 205 m/s 의 강구에 의한 충격거동은 AUTODYN-3D 의 절점탈락기능(erosion)을 사용하여 구현되었다. 절점탈락기능이란 하나의 요소가 충격에 의해 변형이 발생할 때 그 변형율이 변형 한계에 도달하면 삭제되어 해석을 계속 진행할 수 있도록 하는 기능이다.<sup>(9)</sup> 또한 본 논문은 모든 Lagrange, ALE, Shell, Beam 및 비정렬 격자체의 충격해석을 구현하기 위해 적용되는 접촉 알고리즘을 사용하였다. 구체적으로 External Gap 으로 요소의 선형 및 각운동량을 보존하는 알고리즘이다. Fig. 2 는 요소 사이의 Gap 크기를 보여주며 녹색으로 표시되어있는 부분이 요소표면구간의 접촉감지

영역으로 각 요소의 Gap 이다. 이러한 모든 접촉 감지영역의 노드는 관통의 깊이에 비례하여 가해지는 힘에 의해 격퇴되는 원리로 충격해석을 수행한다. Gap 의 크기는 요소간의 상호작용에 관련된 부분으로 가장 작은 요소면의 1/10 에서 1/2 의 범위에 있어야 한다. 본 논문의 시뮬레이션은 150 % 의 절점탈락기능 값을 설정하였고 발사체와 표적체의 상호작용 Gap 크기는 0.048 mm 이다. 강 구형 발사체에 대한 재료물성치는 AUTODYN 표준재료를 사용하였다.<sup>(9)</sup> Fig. 3 은 충돌 후 실험 및 수치 시뮬레이션의 손상 정도 결과를 보여준다. 실험과 시뮬레이션 모두 발사체가 헬멧을 관통하지 못하였고 충격에 의한 변형 자국이 동일하게 발생하였다. 또한 Fig. 4 와 같이 충돌 후 Kevlar 의

**Table 2** Material constitutive model in simulation<sup>(9)</sup>

Structure	EOS	Strengthen model	Failure model
Steel-4340	linear	Johnson-Cook	Principal stress
Stainless steel	shock	Piecewise JC	-

**Table 3** Results of experiment and simulation

Steel plate (mm)	Projectile diameter (mm)	Experiment (mm)	Simulation (mm)
100×100×6	5	1.0	0.95
	10	3.2	3.4
	20	11.0	11.8
100×100×10	20	6.1	6.8

**Table 4** The masses and thickness ratio of each helmet

Type	Kevlar thickness (mm)	Steel thickness (mm)	Total mass (g)
Helmet_1	10	-	1121.1
Helmet_2	8	2	2022.2
Helmet_3	6	4	2896.3

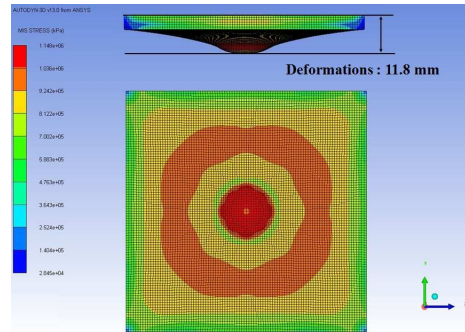
방탄특성에 의해 발사체가 반대 방향으로 이동하는 등 실제 실험과 동일한 충격거동을 볼 수 있었다. 이와 같이 시뮬레이션의 전반적인 결과는 실험에서 관찰된 것과 일치하였다. 또한 Kevlar 재료 상수에 대한 시뮬레이션 검증은 이미 타 논문과 실험에서 입증이 되었고 실험 대체로서의 적용이 충분히 가능성 있다고 판단된다.<sup>(7,8)</sup>

### 3. Steel/Kevlar 혼합복합재 모델링

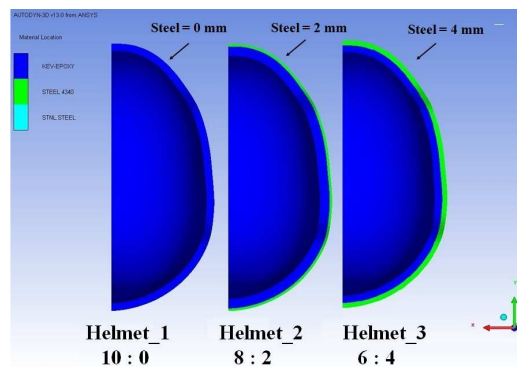
#### 3.1 Steel 사각판재의 충격거동 실험

Kevlar 헬멧의 방탄성능을 향상시키기 위해 Steel/Kevlar 혼합복합재를 방탄헬멧에 적용시켜 탄도저항 평가를 수행하였다. 탄도저항 평가 전산모사를 수행하기 앞서 Steel의 충격거동에 대한 실험과 시뮬레이션 검증을 선 수행하였다.

충남대학교 충격실험장비를 이용하여 Steel 사각판재의 충돌실험을 수행하였다. Fig. 5는 강판으로 100×100 mm 이고 두께는 각 6 mm, 10 mm 이다. 고속 발사체의 경우 직경 5 mm, 10 mm, 20 mm의 다양한 강구를 사용하고, 충돌 초기속도는 2 MPa의 압력으로 약 400 m/s 이다. Fig. 6은 사각판이 고정거치된 모습이다. 시험체 고정판 가운데 위치하며, 고정판의 4 곳을 체결하여 고정하는 형태이다. Fig. 7은 실험 결과 중 6 mm, 10 mm 두께의 사각판에 20 mm의 강구에 의한 충격 거동 실험 결과이



**Fig. 8** The simulation result on the ballistic impact of steel plate



**Fig. 9** Finite element model of impact on Steel/Kevlar composite helmet

며 버니어캘리퍼스 크레이터 직경과 관통 깊이를 측정하였다.

실험과 동일한 조건으로 수치 시뮬레이션을 수행하였고 Table 2은 시뮬레이션에 적용된 강구와 강판의 상태 방정식 및 재료 구성모델이다. 실험과 동일한 치수로 시뮬레이션 모델링 및 해석을 수행하였다. 충돌 후 수치 시뮬레이션 결과는 실험과 동일하게 표적체 전면에 크레이터가 생성되고 후면에는 충격에 의한 변형이 형성되었다. 예로 Fig. 8은 직경 20 mm 강구에 의한 t = 6 mm 표적체의 충돌 후 응력 및 변형 결과이며 관통 깊이는 11.8 mm 이다.

변형량 즉 관통 깊이 측정 결과는 강구의 직경이 증가함에 따라 증가하였고 반면 판의 두께가 증가함에 따라 감소하였다.

실험과 시뮬레이션의 변형량 측정 결과를 Table 3에 비교 및 정리하였다.

시뮬레이션 및 실험 결과 모두 6 mm 두께의 표적체에서 직경 5 mm의 강구에 비해 20 mm의 강구로 충격되었을 때 약 11 배 정도의 더 깊은 관통이 발생하였다. 실험에 의한 Steel 판재의 충격거동 변형량이 시뮬레이션의 결과와 상당히 일치하는 점을 확인하였다.

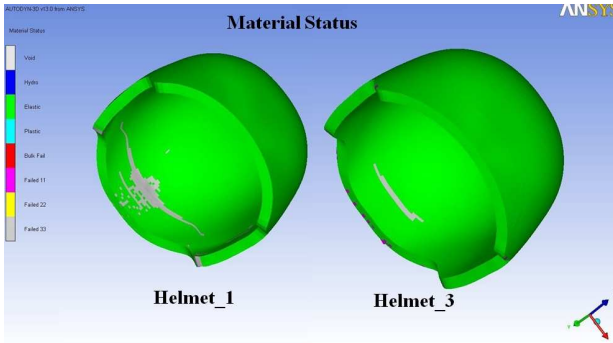


Fig. 10 Damage contours of the helmet

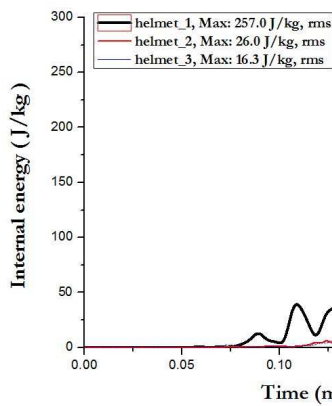


Fig. 11 Internal energy of the helmet versus time

3.2 Steel/Kevlar 헬멧 모델링 및 해석결과

방탄 헬멧의 총 두께는 10 mm 이다. Fig. 9 와 같 이 Y 축 대칭조건으로 Kevlar 와 Steel 의 비율을 10:0, 8:2, 6:4 로 지정하여 3 가지 유형의 헬멧 모델링을 수행하였다. 헬멧의 두께 치수 및 총 질량은 Table 4 에 보여진다. Helmet\_1 에서 Steel 두께가 증가함에 따라 헬멧의 중량은 증가하였고 최대 1,775.2 g 이 더 늘어났다.

Fig. 10 은 충돌 후 전면에서 Helmet\_1 과 Helmet\_3 의 내부파괴 형태 및 파괴 손상수준을 보여준다. 혼합복합재의 경우 단일 Kevlar 보다 내부 파괴가 상당히 줄어들었으며 이는 헬멧의 방탄 성능이 더 향상되었고 발사체의 전달되는 충격 에너지가 적음을 알 수 있었다.

Fig. 11 은 충돌 후 3 가지 유형 헬멧의 측면 내부에너지를 측정하여 비교한 선도이다. 이는 Fig. 12 의 모델링에서 보이는 gage-18 에서 측정된 결과이며 전면에서 측면으로 전달되는 내부에너지로 탄도저항을 평가하기 위함이다.

내부에너지는 충격에너지 흡수의 정도를 나타내는 역학적 에너지의 총합으로서 충돌 후 헬멧의 방어성능을 평가하는 기준으로 적합하다. 본 시뮬

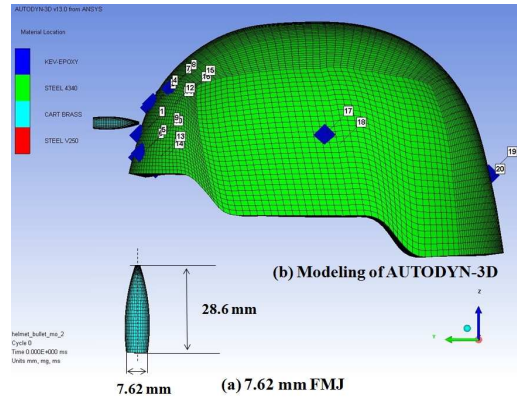


Fig. 12 The Steel/Kevlar helmet with the 7.62 mm FMJ before impact : (a) 7.62 mm FMJ, (b) Modeling of AUTODYN-3D

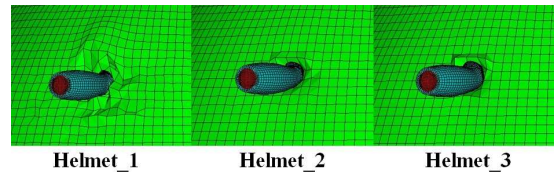


Fig. 13 Front face deformation of the helmet at 358 m/s

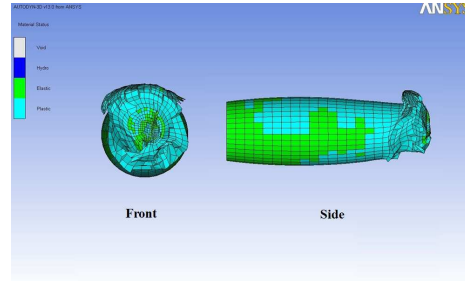


Fig. 14 Shape deformation of projectile for helmet\_3

레이션은 Johnson-Cook 모델을 사용하였으며 Johnson-Cook 모델의 경우 압력과 내부에너지의 관계방정식은 식 (1)과 같이 압력  $p$ , 내부에너지  $E$  와 상태적 볼륨  $V = \frac{\rho_0}{\rho}$  의 관계로 표현된다. 여기서  $\rho_0$  는 초기 밀도이다.<sup>(9,10)</sup>

$$P = P(V, E) \tag{1}$$

Kevlar 헬멧의 경우 최대 257.0 J/kg 의 양이 발생하였다. 반면 혼합복합재의 경우 내부에너지 결과 값이 약 1/16 배정도 감소함을 볼 수 있었다. 이는 발사체에 의해 전달되는 충격에너지가 거의 감소함을 의미하며 생존성 향상 측면에서 방탄성능이 향상되었음을 볼 수 있었다.

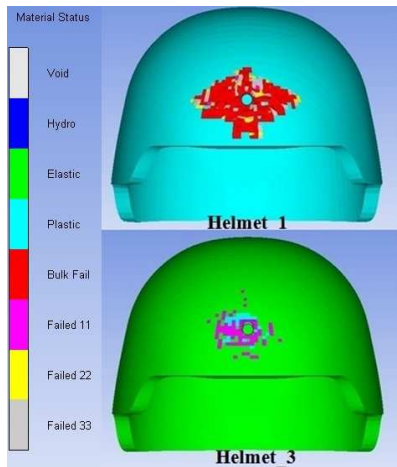


Fig. 15 Failure plots with 7.62 mm FMJ striking at the front face

#### 4. 탄도 7.26 mm FMJ 충격 시뮬레이션

Kevlar 헬멧과 Steel/Kevlar 혼합복합재 헬멧이 NIJ-STD-0106.1 Type 규격에 적합한지 확인하기 위해 시뮬레이션이 수행되었다. 7.62 mm FMJ(full-metal-jacket) 발사체와 전체 모델링은 Fig. 12에 보여진다. 발사체는 TrueGrids를 사용하여 모델링되었고 황동 피복과 납코어의 두 부분으로 구성되어 있는 납탄이다. 헬멧의 탄도저항을 평가하기 위해 7.62 mm FMJ은 시뮬레이션에서 NIJ-STD-0106.1 Type 규격에 맞는 358 m/s의 초기속도를 갖는다. 3 종류의 헬멧 시뮬레이션 결과는 모두 7.62 mm FMJ 발사체를 방어할 수 있다고 나왔다.

Fig. 13은 충돌 후 각 헬멧의 전면 변형정도를 보여준다. 충돌 후 발사체는 nose 부분의 요소가 심하게 변형되어 “mushrooming” 형상을 보였다. 이러한 현상은 발사체의 형상이 관통 과정에 영향을 미칠 수 있다고 볼 수 있다. 특히 Kevlar보다 혼합복합재 헬멧의 경우 Fig. 14와 같이 발사체 nose 부분의 요소가 더 심하게 변형되었다. 이는 충격에 의해 발사체로 전달되는 충격에너지가 증가하고 따라서 발사체의 무더짐(blunting)이 증가하기 때문이다.

Fig. 15는 7.62 mm FMJ가 각 헬멧을 통해 관통함으로써 헬멧의 손상 정도를 나타낸다. 관통의 초기 단계는 발사체의 nose와 접촉면의 압축과 변위에 따라 지배되며 마지막 단계는 발사체에 인접한 접촉면의 진단에 의해 특성화된다. 이러한 충격수준에 따라 손상 정도를 분류할 수 있다. Fig. 15에 보이는 Failure plots은 헬멧의 손상 정도를 나타내며 Bulk Fail, Failed 11, Failed 22, Failed 33

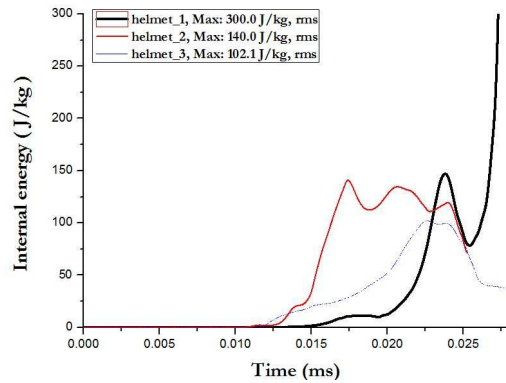


Fig. 16 Internal energy of the helmet versus time

으로 분류된다. Bulk Fail는 완전 파괴를 의미하고 Failed 11~33은 Table 1의 파괴모드에서 인장파괴 변형율을 나타낸다. 혼합복합재 헬멧의 경우 Kevlar보다 손상정도가 더 적은 것으로 나타났고 정확한 수치는 Fig. 16의 내부에너지 선도를 보면 알 수 있다. Fig. 16의 선도는 충격되었을 때 헬멧의 전면내부에서 시간에 따른 내부에너지의 변화이며 gage-10에서 측정된 결과이다. 전면에 다양한 위치에 부착된 gage에서의 결과값 모두 거의 일치하였고 변화가 크지 않아 특정 gage에서 얻은 결과값으로 탄도저항을 평가하였다.

혼합복합재 헬멧의 내부에너지는 충돌 후 일정한 수준의 양이 발생하는 반면 Helmet\_1의 내부에너지는 충돌 후에도 발산하였다. 이는 혼합복합재 헬멧보다 가해지는 충격에너지의 지속 시간이 길며 손상영역의 수준이 더 높은 것을 의미한다. 또한 충격에너지의 계속되는 증가는 측면과 후면으로까지 전달되는 등 생존성 측면에서의 방탄성능이 혼합복합재 헬멧보다 낮다고 볼 수 있다.

헬멧의 방탄성능을 비교하는 또 하나의 방법으로서 방호탄도한계의 측정을 통해 각 헬멧을 비교 및 고찰하였다. 방호탄도한계는 완전관통(CP : Complete Penetration)과 부분관통(PP : Partial Penetration)경우를 통해 방호탄도한계를 측정하는 것이다. 방호탄도한계는 발사체에 의해 표적체가 관통될 가능성이 50% 일 때의 관통자의 충격속도( $V_{50}$ )를 나타낸다. 완전관통과 부분관통의 시뮬레이션 결과를 통해 그 평균값인 방호탄도 한계속도를 나타내었다. 그 결과는 Table 5와 같다. Helmet\_1은 660 m/s 이상의 발사체 충격으로부터 부분관통이기 때문에  $V_{50}$ 은 655 m/s이고 Helmet\_3은 850 m/s의 발사체 충격으로부터 부분관통이므로  $V_{50}$ 은 845 m/s이다. 결과에서 보여지듯 혼합복합재 헬멧의 경우 단일 Kevlar 헬멧보다

Table 5 Results of Protection ballistic limit method

Type	Impact velocity (m/s)	Results	V <sub>50</sub> (m/s)
Helmet_1	640	PP	655
	650	PP	
	660	CP	
	670	CP	
Helmet_2	820	PP	835
	830	PP	
	840	CP	
	850	CP	
Helmet_3	830	PP	845
	840	PP	
	850	CP	
	860	CP	

약 200 m/s 정도 더 방호탄도 한계속도가 높았다.

방탄헬멧에 단일 Kevlar 대신 혼합복합재의 적용은 내부에너지 및 방호탄도한계 측면에서 우수하다고 볼 수 있다. 하지만 이에 따른 헬멧의 중량도 증가하기 때문에 헬멧설계 시 중량 대비 방탄성능 효율 측면을 고려하여 적절한 조합이 필요할 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구를 통해 Kevlar 헬멧의 방탄성능을 향상시키기 위해 Steel/Kevlar 혼합복합재를 대안으로 선택하여, 이에 대한 수치해석을 통해 방탄성능 향상과 적용 가능성을 확인하였다.

(1) 많은 시간과 비용이 소요되는 헬멧의 방탄성능 측정을 수치시뮬레이션으로 대체할 수 있음을 확인하였다.

(2) Kevlar 보다 Steel/Kevlar 혼합복합재를 사용하였을 경우 헬멧의 내부 파괴가 적고 내부에너지 또한 상당히 감소하였다.

(3) Steel/Kevlar 혼합복합재 헬멧은 NIJ-STD-0106.1 Type 규격에 적합하였고 발사체는 Kevlar 보다 충격에 의해 더 심하게 변형되었다. 이는 충격에 의해 발사체로 전달되는 충격에너지가 증가하고 따라서 발사체의 무더짐(blunting)이 증가하기 때문이다.

(4) Kevlar 보다 혼합복합재 헬멧의 경우 총 질량이 약 2 배정도로 증가하였다. 중량이 증가하지만 방탄성능 및 방호탄도한계와 생존성 향상 측면에서 우수하다고 볼 수 있다.

## 후 기

본 논문은 한국연구재단 2012 년도 일반 연구 자지원 지역대학 우수과학자 지원사업(과제번호 : 2012-0004596)의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Kim, S. H., Kim, G. I. and Cho, M. H., 2009, "Experimental Test and Numerical Simulation of Protection Ballistic Limit Velocity on Magnesium Alloy Plates," *Proc. of Spring Conference of the KSME*, pp. 491~495.
- (2) Lee, Y.S., Kim, D.J., Kang, K.H. and Oh, J.S., 1998, "A Study of the Impact Pulse Analysis with Various Shapes and Materials of Impactor," *Trans. of KSME(A)*, Vol.22, No.1, pp.52~63.
- (3) Lee, Y.S., Oh, J.S., Kang, K.H. and Choi, B.D., 1998, "A Study of Penetration History of Conically-Nosed Bullet on Layered Targets," *Trans. of KSME(A)*, Vol.22, No.6, pp.1022~1035.
- (4) Lee, Y.S., Kim, D.J., Kang, K.H. and Oh, J.S., 1998, "A Study of the Penetration Characteristics of the Rigid Impactor into the Lead Target," *Journal of the Computational Structural Engineering Institute*, Vol.11, No.4, pp.147~154.
- (5) Rosenberg, Z., Surujon, Z., Yeshurun, Y., Ashuach, Y. and Dekel, E., 2005, "Ricochet of 0.3" AP Projectile from Inclined Polymeric Plates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.31, No.3, pp.221~233.
- (6) Dorogoy, A., Rittel, D. and Brill, A., 2010, "A Study of Inclined Impact in Polymethylmethacrylate Plates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.37, No.3, pp.285~294.
- (7) Tham, C. Y., Tan, V. B. C. and Lee, H. P., 2008, "Ballistic Impact of a KEVLAR Helmet : Experiment and Simulation," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.35, pp. 304~318.
- (8) Hiermaier, S. J., Riedel, W., Clegg, R. A. and Hayhurst, C. J., 1999, "Advanced Material Model for Hypervelocity Impact Simulations," ESA Contract No. 12400/97/NL/PA(SC) Final Report.
- (9) WWW.ANSYS.COM, 2011, "ANSYS / AUTODYN-3D," 12.1 User's Manual, Material Models Chapter.
- (10) Magnus, A. and Svein, K., 2007, "Evaluation of Head Response to Ballistic Helmet Impacts Using the Finite Element Method," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.34, pp. 596~608.