



다구찌 설계법을 이용한 주름댐퍼를 갖는 헬멧안전의 감쇠효과에 관한 연구

†김청균

홍익대학교 트리보메카에너지기술 연구센터
(2008년 10월 21일 접수, 2008년 12월 8일 수정, 2008년 12월 8일 채택)

On the Damping Effects of Helmet Safety with a Corrugation Damper using Taguchi's Optimization Design

†Chung Kyun Kim

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology, Hongik University, Seoul 121-791, Korea
(Received 21. October. 2008, Revised 8. December. 2008, Accepted 8. December. 2008)

요 약

FEM과 다구찌의 설계기법을 이용하여 헬멧의 주름댐퍼에 걸리는 수직방향 변위량, von Mises 응력, 변형률 에너지를 주름댐퍼의 돌출길이와 두께, 주름댐퍼의 상단코너반경과 하단코너반경의 함수로 각각 분석하였다. 주름댐퍼의 형상에 대한 최적의 설계요소는 헬멧에 전달되는 외부의 충격력에 의해 형성되는 충격에너지를 흡수할 수 있는 감쇠용량, 즉 변형률 에너지를 높여줄 수 있다는 측면에서 대단히 중요하다. 본 연구에서 다구찌 설계법에 기반한 최적설계는 주름댐퍼의 돌출길이 $L=20$ mm, 두께 $t=2$ mm, 상단코너반경 $R_1=4$ mm, 하단코너반경 $R_2=3$ mm로 계산되었다. 주름댐퍼의 설계에 가장 큰 영향을 미치는 핵심요소는 주름댐퍼의 두께와 돌출길이이고, 이들 설계요소는 헬멧의 충격에너지 흡수용량을 나타내는 변형률 에너지 증가에 대한 기여도가 높다.

Abstract – Using the finite element method and Taguchi's design technique, the displacement in vertical direction, von Mises stress, and strain energy of the corrugation damper have been analyzed as functions of the extruded length and the thickness of the corrugation damper, and the upper and lower corner radii of the damper. The optimized profile design elements of a corrugation damper are very important for increasing a strain energy absorption capacity of a helmet structure, which is attacked by impulsive external forces. In this study, the optimized design data based on the Taguchi's method was computed as a corrugation damper length of $L=20$ mm, a damper thickness of $t=2$ mm, the upper corner radius of $R_1=4$ mm, and the lower corner radius of $R_2=3$ mm. The optimized design parameters of a corrugation damper indicated that the thickness and extruded length of a corrugation damper may affect to increase the strain energy, which absorbs the impact forces of the helmet.

Key words : corrugation damper, helmet, finite element method, optimization design

I. 서 론

가스폭발에 의한 화재가 가스연료를 많이 사용하는 산업현장, 아파트나 상가밀집 지역 등에서 발생할 경우 그 피해정도는 대단히 크다. 가스폭발 과정에서 형성된 압력은 주변의 물체를 날려 보내 낙하체를 많이 발생하고, 높은 폭발압은 건물을 붕괴시킬 정도로 위험하

로 화재현장에 진입하는 가스안전 관리자와 소방관은 안전헬멧을 착용해야 한다.

헬멧은 머리를 보호하기 위해 착용하는 개인 안전장비이다. 산업현장에서 많이 사용하는 안전모는 가벼운 충격이나 비바람, 눈 등에 견딜 수 있으면 되지만, 오토바이나 경주용 차량을 운전하는 경우는 높은 충격에너지를 흡수할 수 있어야 한다. 또한, 가스폭발, 화재지역 등에서 작업을 하는 소방관이나 가스안전 작업자는 높은 충격에너지 및 내열성을 확보할 수 있는 안전모,

†주저자: chungkyunkim@empal.com

암벽 등반가는 낙하체의 충격력에 견디는 안전헬멧을 필요로 한다.

헬멧안전에 대한 연구는 오토바이용 헬멧[1,2], 야구용 헬멧[3], 소방가스용 헬멧[4,5] 등 다양하지만 아직은 초보단계이다. 이들 연구는 주로 낙하체에 대한 충돌시험에 집중되고, 충격에너지를 완화시킬 수 있는 헬멧의 감쇠안전에 대한 연구는 아직 없다.

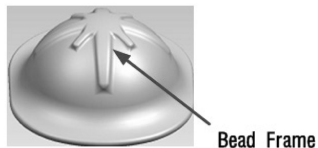
따라서 본 연구에서는 외부물체의 충돌에 의해 발생하는 충격에너지를 최대한 흡수할 수 있는 감쇠용 돌출주름을 헬멧의 안전장치로 설계하여 내충돌 안전성을 확보한 기반연구를 다구찌 설계기법으로 수행하여 최적의 설계조건을 찾고자 한다.

II. 주름댐퍼를 갖는 감쇠헬멧

외부의 낙하체에 의한 충격력은 Fig. 1(a)처럼 정상부에 설치한 방사형의 기다란 주름뼈대에 의해 차단된다. 이때에 발생된 충격에너지는 헬멧에 전달되므로 헬멧 착용자는 머리와 목에 부상을 당할 수 있고, 피로중압감으로 인해 헬멧을 오랫동안 쓰고 작업하기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 머리에 전달되는 충격에너지를 최소화할 수 있도록 헬멧의 하단부에 별도의 주름댐퍼를 Fig. 1(b)와 같이 설치하여 헬멧착용에 따른 부상 위험성이나 피로 압박감을 줄일 수 있는 주름댐퍼에 대한 최적설계를 수행하고자 한다.

결국, 주름댐퍼를 갖는 헬멧은 기존의 헬멧에 별도의 환형주름을 헬멧의 하단부에 설치한 것으로 헬멧의 정상부에 가해지는 충격력을 흡수할 수 있는 기능이 추가된 것으로 헬멧 착용자가 느끼는 충격에너지는 크게 줄어들 것으로 예상된다.



(a) Conventional Helmet



(b) Helmet with a corrugation damper

Fig. 1. Helmets for a gas worker and fire fighter.

III. 다구찌 설계기법

3.1. 주름댐퍼에 대한 다구찌 설계기법

헬멧은 충돌체에 의한 파손을 차단할 수 있는 강도 안전과 감쇠기능을 확보하고 있어야 한다. 본 연구는 헬멧에 가해지는 충격에너지를 효과적으로 감쇠할 수 있는 주름댐퍼의 최적설계에 관심을 갖고 있다. 즉, 다구찌의 최적설계법으로 주름댐퍼의 감쇠효과를 검증하고, 기존헬멧에 비해 충격에너지를 많이 흡수하는 새로운 헬멧을 설계하고자 한다.

다구찌 설계기법은 특성치 산포를 통해 주름댐퍼의 설계인자에 대한 거동조건을 최적화하는 것이다. 이때에 특성치의 산포가 가장 적은 값을 최적조건으로 나타내면 되고, 특성치 산포는 SN비로 예측할 수 있다.

본 연구에서는 헬멧에서 발생하는 변위량, 응력, 변형률 에너지를 특성치로 선정하였다. 헬멧의 변위량과 변형률 에너지는 클수록, 그리고 응력은 작을수록 우수한 설계조건이 된다. SN비가 큰 경우, 추정된 설계인자에 의한 변위량과 변형률 에너지는 안정되고, 우수한 설계가 된다. 또한 SN비를 사용하여 설계인자들이 최적설계에 미치는 영향을 간이분석법을 통해 관찰하고, 각각의 인자들이 특성치에 미치는 기여율을 계산하여 설계인자 특성을 분석한다.

3.2. 설계인자 및 수준

Fig. 2는 다구찌 설계기법에 필요한 4개의 설계인자를 보여주고 있다. 즉, 주름댐퍼의 돌출길이(L), 주름댐퍼의 두께(t), 상단코너반경(R_1), 하단코너반경(R_2)이다.

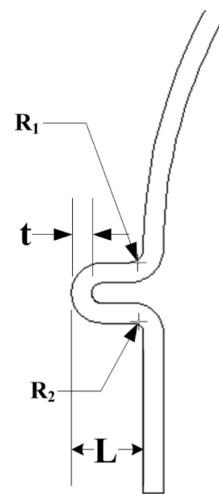


Fig. 2. Four design parameters for Taguchi's design method.

Table 1. Design factors and levels for Taguchi's design method.

Factor Level	L(mm)	t(mm)	R ₁ (mm)	R ₂ (mm)
1	10	2.0	2.0	2.0
2	15	2.5	3.0	3.0
3	20	3.0	4.0	4.0

Table 2. Material property of polycarbonate.

E (GPa)	Poisson's ratio	Tensile strength (MPa)	Density (kg/m ³)
2.53	0.39	54.3	1,150

Table 3. Orthogonal array table of L₉(3⁴).

Model no.	L	t	R ₁	R ₂
1	10	2	1	1
2	10	3	2	2
3	10	4	3	3
4	15	2	2	2
5	15	3	3	3
6	15	4	1	1
7	20	2	3	3
8	20	3	1	1
9	20	4	2	2

이들 설계인자는 충격에너지 흡수에 영향을 미치는 감쇠설계의 기본요소로 헬멧의 충격강도 안전성 해석에 중요하다.

Table 1은 헬멧의 4가지 설계인자에 대한 수준 3가지, Table 2는 헬멧의 폴리카보네이트(PC)에 대한 주요 물성치를 각각 나타낸 것이다.

헬멧의 두께는 보통 4 mm이지만, 기존에 수행한 연구결과[5]에서 제시한 3 mm 두께의 헬멧도 어느 정도의 강도안전성을 확보하는 것으로 나타났기 때문에 헬멧의 경량화 측면에서 주름댐퍼의 두께를 2~3 mm로 얇게 설계하였다.

Table 3은 다구찌 설계기법에서 설계인자를 모두 고려할 수 없으므로 4인자 3수준의 직교배열 테이블을 사용하여 총 81개의 설계모델을 9개로 축소하여 각각의 인자에 대한 변위량, 응력, 변형률 에너지에 미치는 영향을 고찰하였다. 여기서 변위량은 헬멧의 충격에너지 전달량을 줄여주는 효과를 기대할 수 있고, 응력은 헬멧의 강도안전과 변형거동에 대한 특성분석, 그리고 변

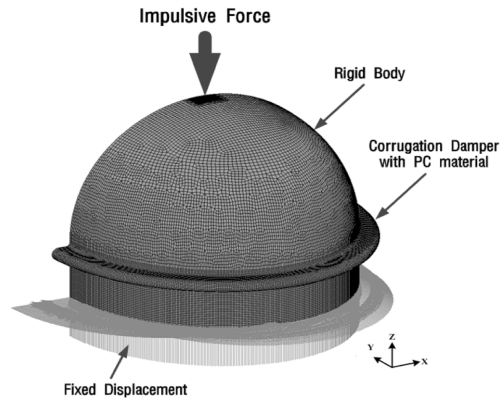


Fig. 3. Finite element model and boundary conditions.

형률 에너지는 헬멧이 흡수할 수 있는 감쇠효과 설계 지수로 활용할 수 있다.

IV. 유한요소해석

Fig. 3은 헬멧의 충격력 전달에너지 감쇠효과를 해석하기 위한 FEM 모델 및 경계조건을 나타내고 있다. 헬멧두께는 2~3 mm로 헬멧의 크기에 비해 대단히 작기 때문에 FEM에서 쉘요소(shell element)를 사용하였고, 헬멧의 감쇠효과를 해석하기 위해 주름댐퍼의 상단부는 강체(rigid body)로, 하단부는 바닥면에 지지, 즉 아래 방향으로 변위량은 없는 것으로 가정한다.

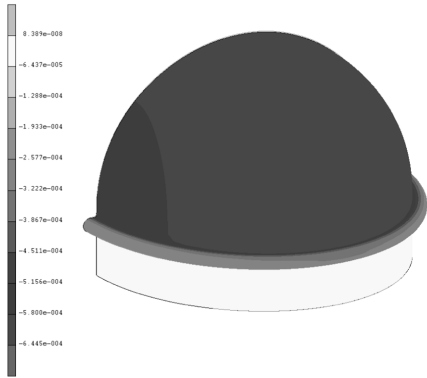
헬멧의 강도안전 기준은 2001년 행정자치부에서 제정한 헬멧규정[6]에 의거, 헬멧의 정상부에 3.58 kg±0.05 kg의 철제추(steel cone)를 1.5 m의 위치에서 떨어뜨렸을 때 헬멧 착용자에게 전달되는 초기의 최고 충격력은 4,540 N을 초과해서는 안 된다. 따라서 헬멧에 작용하는 외부하중은 Fig. 3에 보여주는 것처럼 헬멧 정상부에서 수직으로 작용하고, 충격에너지는 모두 주름댐퍼로 전달되어 감쇠되는 해석모델을 사용하였다.

V. 해석결과 및 고찰

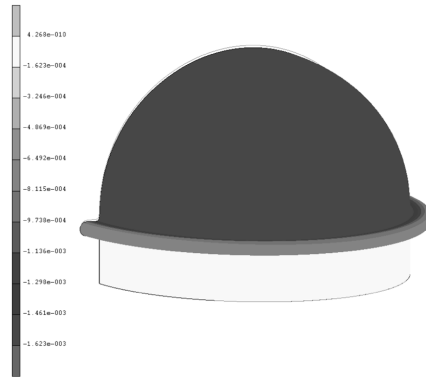
Figs. 4~6은 헬멧의 하단부에 설치한 주름댐퍼를 최적의 감쇠효과를 얻기 위해 Table 3에서 제시한 9개의 모델중 대표적인 설계모델 3가지에 대한 변위량, 응력, 변형률 에너지 해석결과를 제시하였다.

주름댐퍼를 갖는 설계모델 1의 해석결과를 제시한 Fig. 4에 의하면, 외부의 충격에너지에 의해 발생한 수직방향의 최대 변위량은 0.64 mm, 주름댐퍼에 걸리는 von Mises 최대응력은 3.7 MPa, 최대 변형률 에너지는

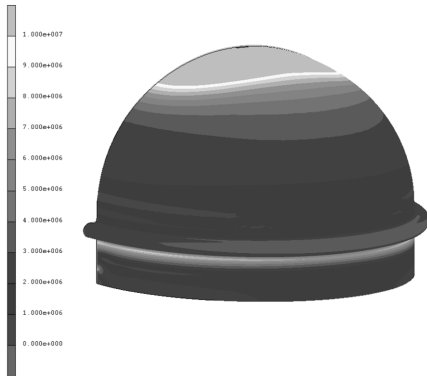
다구찌 설계법을 이용한 주름댐퍼를 갖는 헬멧안전의 감쇠효과에 관한 연구



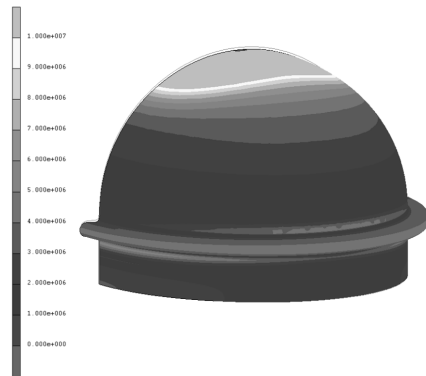
(a) Displacement distribution in vertical direction



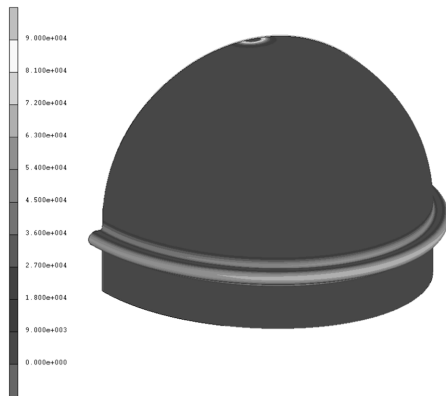
(a) Displacement distribution in vertical direction



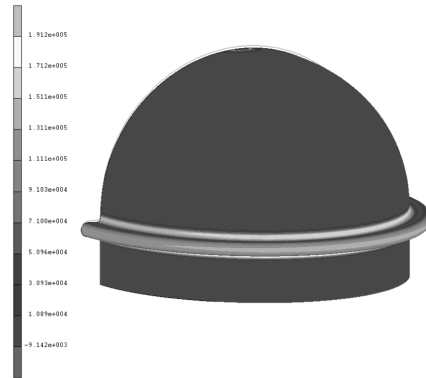
(b) von Mises stress distribution



(b) von Mises stress distribution



(c) Strain energy distribution



(c) Strain energy distribution

Fig. 4. FEM computed results of 1st helmet model with a corrugation damper.

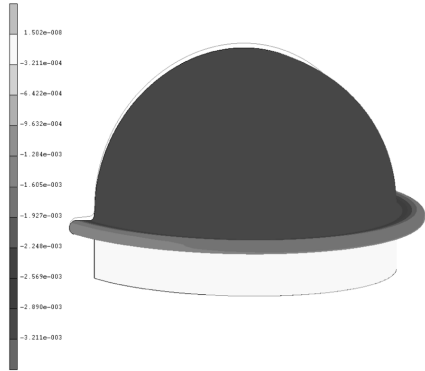
0.15 MPa로 기존의 헬멧에 비해 충격에너지 흡수력은 크게 향상되었다. 여기서 변위량과 변형률 에너지가 높을수록 충격전달 에너지 흡수효과는 우수하지만, 응력

Fig. 5. FEM computed results of 4th helmet model with a corrugation damper.

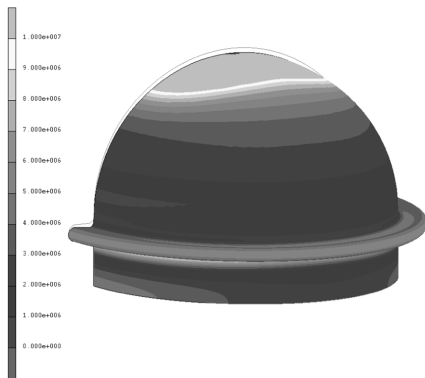
은 낮게 유지되어야 강도안전성이 확보된다.

Fig. 5의 결과에 의하면, 설계모델 4에서 수직방향의 최대 변위량은 1.65 mm로 모델 1에 비해 배나 증가하였고, 주름댐퍼의 von Mises 최대응력은 4.85 MPa로

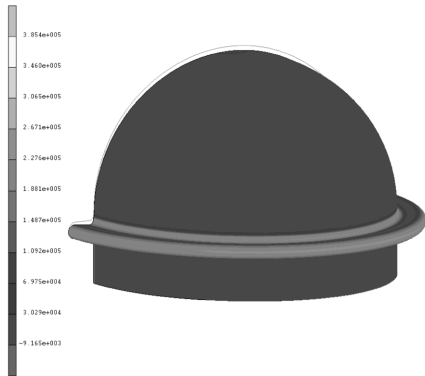
높아졌지만 안전하고, 최대 변형률 에너지는 0.19 MPa 정도로 크게 증가한 데이터를 제시한다. 설계모델 4의 변위량과 변형률 에너지는 모델 1에 비해 높아졌기 때문에 충격전달 에너지를 흡수할 수 있는 감쇠효과는 그



(a) Displacement distribution in vertical direction



(b) von Mises stress distribution



(c) Strain energy distribution

Fig. 6. FEM computed results of 7th helmet model with a corrugation damper.

만큼 향상되었다. 비록 헬멧의 응력은 약간 증가하였지만 소재의 인장강도에 비해 크게 낮아 강도안전성에는 전혀 문제가 없다.

Fig. 6의 FEM 해석결과에 의하면, 설계모델 7에 대한 수직방향의 최대 변위량은 3.25 mm로 설계모델 4에 비해 2배나 높아졌고, 주름댐퍼에 걸리는 최대응력은 5.7 MPa로 상승하였지만 충분히 안전하고, 최대 변형률 에너지는 0.38 MPa로 급상승된 결과를 각각 제시하였다.

Figs. 4~6의 해석결과에 의하면, 설계모델 7의 변위량과 변형률 에너지는 설계모델 1이나 모델 4에 비해 크게 증가하여 충격전달 에너지를 흡수하는 감쇠효과는 좋아졌다. 다만, 헬멧에 걸리는 응력은 설계모델 1이나 4에 비해 증가하였지만, 아직도 소재의 인장강도에 비해 크게 낮기 때문에 강도안전성에는 전혀 문제가 없다.

Fig. 7은 주름댐퍼를 갖는 헬멧의 변위량을 최대한 확보하여 헬멧에 전달되는 충격에너지를 감쇠할 수 있는 주름댐퍼 해석모델 9가지에 대한 거동특성을 비교한 결과이다. 여기서 헬멧은 타원형으로 제작하므로 헬멧의 앞뒤를 연결한 길이는 장축(major axis), 측면을 연결한 길이는 단축(minor axis)으로 나타내고, 본 고찰에서는 장축을 기준으로 특성치를 분석하였다. Fig. 7의 9개 모델중에서 최대 변위량을 제시한 설계모델은 7번으로 주름댐퍼의 돌출길이가 $L = 20$ mm로 길고, 두께가 $t = 2$ mm로 얇다는 특징을 갖는다.

Fig. 8은 헬멧의 주름댐퍼에 걸리는 von Mises 최대 응력을 나타낸 결과이다. 설계모델 7번에서 최고응력 5.7 MPa를, 그리고 설계모델 9번에서 최저응력 1.7 MPa를 각각 제시하였는데, 이들 응력은 소재의 인장강도에 비해 충분히 낮기 때문에 안전하다.

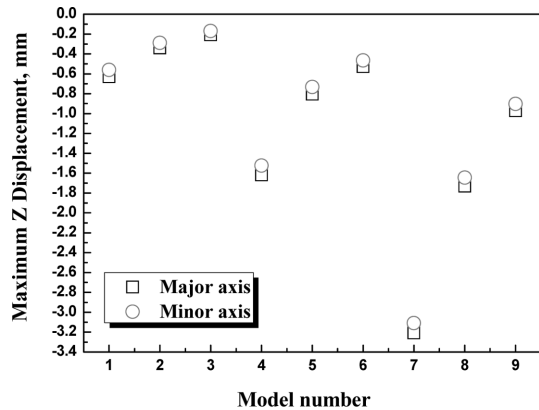


Fig. 7. Maximum displacement for nine design models with a corrugation damper.

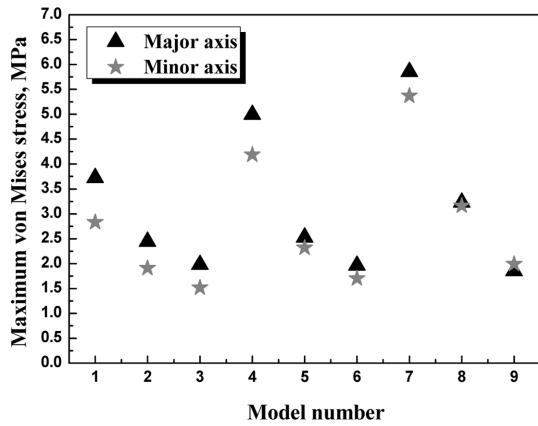


Fig. 8. Maximum von Mises stress for nine design models with a corrugation damper.

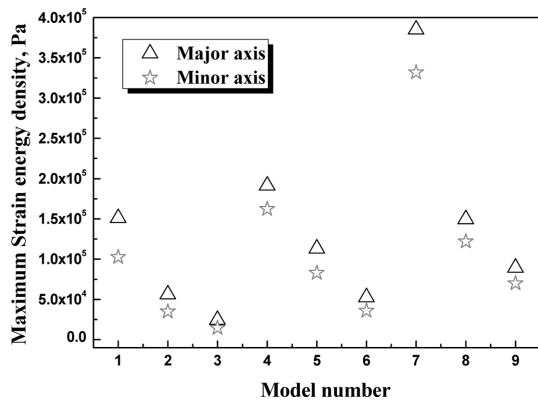


Fig. 9. Maximum strain energy for nine design models with a corrugation damper.

Fig. 9는 헬멧의 감쇠효과를 나타내는 최대 변형률 에너지를 나타낸 것이다. 여기서 설계모델 7은 0.38 MPa의 최대 변형률 에너지를 제시하였다. 결국 변형률 에너지가 높으면 헬멧의 변형거동 감쇠특성이 우수하여 외부의 충격에너지를 잘 흡수할 수 있다.

Figs. 7-9의 해석결과에 의하면, 설계모델 7은 높은 변위량과 변형률 에너지를 나타내므로 충격에너지 감쇠효과가 탁월하고, 헬멧에 걸리는 응력은 다른 모델에 비해 높기는 하지만 사용소재의 인장강도에 비해 대단히 낮기 때문에 안전하다.

Table 4는 헬멧의 주름댐퍼에 대한 최적설계를 위해 9개 설계모델의 변위량, von Mises 최대응력, 변형률 에너지를 SN비로 나타낸 해석결과이다. 본 설계는 변위량이 많이 발생하고, 변형률 에너지가 높아야 감쇠효과

Table 4. SN ratio of nine Taguchi's design models.

No.	Z Displacement	von Mises stress	Strain energy
1	-4.03	-11.41	103.58
2	-9.35	-7.75	95.01
3	-13.64	-5.93	87.79
4	4.17	-13.97	105.63
5	-1.91	-8.05	101.06
6	-5.56	-5.85	94.41
7	10.12	-15.35	111.71
8	4.77	-10.18	103.49
9	-0.26	-5.34	99.02

Table 5. Affecting ratio of design factors.

Affecting ratio (%)	Design factors			
	L(mm)	t(mm)	R ₁ (mm)	R ₂ (mm)
Displacement	57.8	41.25	0.84	0.12
von Mises stress	17.82	72.88	5.83	3.47
Strain energy	38.30	54.64	1.26	5.80

가 우수하므로, SN비가 크게 나타난 설계모델 7번을 최적의 설계조건으로 선정하였다. 즉, 주름댐퍼가 최대의 감쇠효과를 내기 위해서는 주름댐퍼의 돌출길이 L = 20 mm, 주름댐퍼의 두께 t = 2 mm, 상단코너반경 R₁ = 4 mm, 하단코너반경 R₂ = 3 mm로 설계하는 것이 바람직하다.

Table 5는 헬멧의 주름댐퍼 설계인자 4개가 변형률, 응력, 변형률 에너지에 미치는 기여도를 계산한 해석결과이다. 주름댐퍼의 변위거동에 가장 큰 영향을 주는 설계인자는 57.8%로 추정된 주름댐퍼 돌출길이이고, 응력에 영향을 많이 주는 설계인자는 72.9%의 두께로 나타났고, 변형률 에너지에 큰 영향을 주는 설계인자는 54.6%의 두께이다. 반면에 상단코너반경 R₁이나, 하단코너반경 R₂는 설계조건에 미치는 기여율이 대단히 낮게 나타났다.

따라서 헬멧의 주름댐퍼를 설계하기 위해서는 변위량과 변형률 에너지를 높게 하는 설계조건을 찾아야 한다. 결국, 충격에너지 감쇠효과가 높은 헬멧을 설계하기 위해서는 주름댐퍼의 두께는 가능한 얇게, 돌출길이는 길게 선정해야 한다.

VI. 결 론

본 연구에서 헬멧에 전달되는 충격에너지를 최대한

감쇠시킬 수 있도록 주름댐퍼를 다구찌 설계법으로 최적화를 수행하였다.

헬멧의 감쇠효과를 높일 수 있는 변위량, 응력, 변형률 에너지 특성치를 분석한 결과에 의하면, 해석모델 7번이 가장 우수한 것으로 나타났다. 즉, 주름댐퍼의 돌출길이(L)는 20 mm, 주름댐퍼의 두께(t)는 2 mm, 상단 코너반경(R₁)은 4 mm, 하단코너반경(R₂)은 3 mm로 설계하는 것이 바람직하다.

따라서 헬멧의 주름댐퍼에 대한 최적의 설계조건을 찾기 위해서는 변위량과 변형률 에너지를 높게 유지해야 한다. 결국, 헬멧의 충격에너지 감쇠효과를 높일 수 있도록 주름댐퍼의 두께는 가능한 얇게, 돌출길이는 길게 설계해야 충격에너지 흡수효과는 대단히 우수해진다.

참고문헌

[1] 최명진, “시물레이션에 의한 오토바이 헬멧의 충격

응답 분석”, 한국시물레이션학회지, **8**(4), 25-31, (1999)

[2] Li-Tung Chang, “Finite Element Analysis of the Effect of Motorcycle Helmet Materials against Impact Velocity”, *J. of the Chinese Institute of Engineers*, **26**(6), 835-843, (2003)

[3] 최경임, “야구용 헬멧의 안전성 평가 방법”, 안전경영학회지, **4**(2), 1-10, (2002)

[4] 한응교, 엄기원, 박준서, 이성우, “소방 안전모의 안전도 평가에 관한 연구”, 한국화재학회지, **5**(3), 5-14, (1991. 11)

[5] 김한구, 심종현, 김청균, “소방가스안전용 헬멧의 강도안전성에 관한 연구”, 한국가스학회지, **12**(3), 31-37, (2008)

[6] 소방용헬멧 규격서, 행정자치부 제정, (2001. 9. 29)