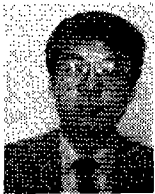


자동차 상해와 그 대책에 대한 고찰

The Cause and Control in Automobile Accident Related Trauma

윤 영 한, 이 중 현*, 김 규 현*, 송 진 화*, 이 재 완*
 Y. H. Youn, J. H. Lee, K.H.Kim, J.H.Song, J. W. Lee



윤 영 한

- 1955년 5월 22일생
- 자동차 충돌 및 승객보호, 자동차 관련 안전법규
- 교통안전진흥공단 자동차 성능 시험연구소, 책임연구원

당히 경감될 수 있다. 또한 자동차 사고로 인한 외상의 경우는 음주운전 금지, 안전띠의 무착용과 같은 예방적이고 보호차원의 방법을 통한 잠재효과가 있는 것이다.

본 연구는 자동차 사고시 부상을 입는 경위, 부상방지 및 감소를 위한 장치나 구조등에 대해서 소개하고자 한다.

1. 서 론

인체는 외부 물체와의 접촉으로 신체조직이 회복될 수 없는 상태로 되는데 이때 무생물에 대해서는 기계적 파손이라고 하며, 생명체에 대해서는 이물 외상(Trauma)이라고 정의한다. 자동차로 인한 상해는 주로 사고시 충돌로 인체조직에 직접적인 관통, 압박 및 파괴 또는 조직이 자중에 의해서 이완, 분리되는 갑작스런 운동의 변화로 그 원인을 들 수 있다. 예를들면 머리 부분이 급격히 멈추게 되면 두개골 후방으로 운동지연이 일어나 두뇌 조직에 전단력이나 늘어짐이 발생해서 혈관이 찢어지거나 신경에 손상을 입게 된다.

외상이 질병을 수반하게 될 경우 그 원인을 이해하는 것은 질병을 예방하고 치료하는데 중요한 역할을 한다. 이와같이 만일 충돌중에 승차자에게 적절한 보호장치가 있고 응급조치가 빠른 시간내에 이루어진다면 상해정도는 상

2. 자동차 사고의 원인

먼저 자동차 충돌사고가 왜 일어나는지 그 이유를 알면 보다 적절한 충돌사고 감소의 효과를 얻을 수 있을 것이다. 일반 대중의 견해는 대부분의 자동차 사고는 자동차의 기계적 결함으로 인해 조정기능 상실등으로 충돌사고로 이어진다고 믿어왔다. 그러나, 실제 미국의 교통사고를 조사분석한 통계보고에 따르면 전체의 3/4은 재산피해에 불과하고 1/4이 승차자 부상과 관련이 있으며 단지 1%만이 사망한다는 보고가 있다. 또한 충돌현장 조사를 통해 인적, 환경 및 자동차 요인중 어느 것이 보다 중대한 영향을 끼치는지 알 수 있다. 만일, 요인들중 사고가 단일 요인으로 발생하였다면 그 요인을 제거하면 같은 유형의 사고는 일어나지 않을 것이다. 그러나 일반적으로 사고는 여러 요인이 유기적으로 관련되

어 있으므로 각각의 원인을 종합적으로 조사분석하여 이를 최소로 하였을 때 사고의 심각성을 감소할 수 있다. 각 충돌에 대한 연관된 요인에 대한 접근법은 두가지 단계로 나눌 수 있다. 즉, 사고순간을 나타내는 운전자, 자동차 및 운전조건에 상대적인 결합을 규명하는 것과 각 결합을 최소 허용상태로 줄였을 때 사고가 일어나지 않은지를 조사하는 것이다.

미국의 조사결과에 의하면, 인적 요인이 사고의 약 71%로서 가장 빈번한 것으로 나타났으며, 환경요인이 12%이고 자동차 요인이 가장 적은 단지 4%에 불과하였다. 인적 요인의 경우 57%가 사고의 단일 원인이며, 26%는 인간 및 환경요인의 복합이고 6%가 인간 및 자동차 요인이며, 3%만이 환경요인임을 알 수 있다.

인적 요인은 크게 두 범주로 나눌 수 있는데 첫째는 인식 및 판단 에러, 부적절한 전후방 주시, 부주의 및 그릇된 가정의 영향 및 사고와 가장 관련깊은 과속등과 같은 인간적 실수로 사고의 가장 큰 부분을 차지한다. 반면 음주운전, 약물복용, 피로, 감정, 도로사정 미숙 및 운전미숙등의 인적 상황으로 인한 사고는 비교적 낮은 비율을 나타내고 있다. 환경요인으로서 도로설계조건, 시계 등의 요인은 운전자나 자동차와는 거의 무관하다고 밝혀졌다. 그러나 가장 빈번한 요인은 도로의 미끄러움, 도로상 시야장애, 잠재위험 등이다. 자동차 요인으로는 브레이크 파열, 마모된 타이어 및 저타이어압 등의 정비불량이 가장 큰 원인이다.

그러므로, 사고회피(Accident Avoidance) 및 감소문제에 사람의 행동여하에 달려 있으므로 잘못된 운전습성을 바꾸도록 노력하며 적절한 경고장치를 통해 사고를 예방할 수 있다. 그러나 인적 및 환경적 요인의 개선은 장기간의 개선기간과 막대한 시설 투자비가 요구되므로 결국, 자동차사고로 인한 상해를 최소화하기 위해서는 자동차 안전성능 개선에 그 초점을 맞추어야 할 것이다.

3. 상해 생체 공학 (Injury Biomechanics)

사고시 승객 상해의 극소화는 자동차 승객보호 시스템을 설계시, 상해 메카니즘과 인간의 충돌 허용한계를 이해, 적용함으로써 이룩할 수 있다. 상해 메카니즘은 조직손상 및 기능손상을 일으키는 물리적 과정인 반면, 인간의 충돌 허용한계는 인체가 치명적인 상해없이 견딜 수 있는 비정상적인 스트레스 및 하중을 말한다.

정면 충돌시 자동차는 장애물과의 "1차 충돌"로 승차자와 자동차 내부와의 연쇄적 충돌을 유발시킨다. 이와같이 내부 관벨이나 좌석 안전띠로 인해 신체중의 일부에 국부하중이 생기는데 이를 "2차 충돌"이라 한다. 또한, 인체가 자동차 내부 및 구속장치에 의해 정지되는 동안 인체내부에서는 부드러운 조직과 골격간에 또다른 충돌이 발생하는데 이를 "3차 충돌"이라고 부른다. 이러한 2차 및 3차 충돌은 신체부위 및 충돌의 위치, 속도의 정도에 따라 차이가 난다.

얼굴에 가해지는 충격은 열상과 두개골 파손의 원인이 된다. 그러나 동시에 충격을 받는 두부는 부드러운 두뇌보다 단단한 두개골에 급작스런 감속도가 가해진다. 이 상대운동의 결과 외부하중이 가해지는 면에는 내부 충격이 가해지고 두뇌자체는 변형을 입으며, 반대쪽에는 두개골로부터 두뇌가 찢어지는 현상이 일어난다. 이러한 과정 동안 조직의 압박, 늘어남, 전단력이 가해져서 혈관 및 신경이 손상을 입게 된다.

흉부부상의 근본 메카니즘은 무던 물체와의 충격시 갈비뼈의 직접적인 압박과 함께 내부기관 및 혈관의 늘어짐 현상이다. 가슴압박이 갈비뼈 한계를 넘으면 갈비뼈가 부러지게 되고 내부기관 및 혈관이 파손될 수 있다. 그러나 어떤 경우는 골격의 손상없이 내부 부상이 발생할 수도 있다. 이러한 현상은 특히 고속하중시 일어날 수 있으며, 인체조직의 점성 또는 감응율로 기인하며 서로 다른 저속 대

고속 충격반응 때문이다.

기관 또는 혈관에 하중이 천천히 가해지면 가해진 에너지는 변형을 통해 점차적으로 흡수된다. 그러나 갑자기 하중이 가해지면 점성이 있는 조직은 갑자기 충분히 변형될 수 없고 조직의 높은 내부 압력으로 발전해서 갈비뼈가 충분히 변형되기 전에 부러질 수 있다.

관통 및 비관통 충격 모두 부상의 유형과 심각도를 결정하는 근본요소는 충격에너지가 가해지는 신체부위면의 정도 및 충격하는 물체의 속도이다. 효과적인 구속장치는 충돌에너지를 차체구조물로 분산시킬 뿐 아니라 인체와 인체부위가 부딪히게 되는 표면과의 접촉속도를 현저하게 감소시켜 준다. 그러한 시스템을 설계하기 위해 의학적인 인체 상태를 정량적인 하중, 가속도 또는 변형량과 같은 측정 및 이해 가능한 공학적 수치로 변환하여 이들 값들로 부상수준을 예측하고자 하는데 이를 상해기준(Injury Criteria)이라 한다.

3.1 가속도 허용기준 (Acc. Tolerance Criterion)

현재 가장 널리 적용되고 있는 상해기준으로 인체의 상해정도를 인체가 강체라고 가정하여 인체의 각 부위가 받는 가속도의 값으로 규정한 것으로 뉴턴의 제 2법칙에 따라 가속도값이 커지면 충격력이 커지고 따라서 상해위험이 높아진다는 이론이다. 예를들면, 정면충돌시 운동에너지는 충돌속도가 35mph일 때는 30 mph에 비해서 1/3 이상 많으며 사상을 또한 2~3배 증가하게 된다. 일반적인 충돌시간에 따른 충돌감속도 허용한계와의 상관관계는 그림 1에 나타나 있다. 승차자 보호 시스템의 의미는 비록 상대적으로 차체의 감속도가 높더라도 충돌의 감속이 장시간에 걸쳐 일어나게 하면 상해의 위험은 감소될 수 있다. 이러한 원리로 차체의 찌그러지는 구조 및 좌석 안전띠를 통해서 인체의 정지거리시간을 증가시킴으로서 상해의 정도를 조절할 수 있다.

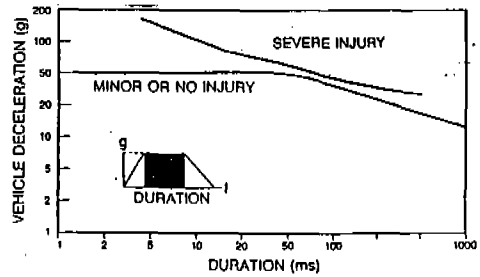


Fig. 1 Human tolerance to vehicle deceleration based on impact duration

3.2 하중 허용 한계 (Force Tolerance Criterion)

1960년대에 들어서 자동차 안전부문 엔지니어들은 몸통에 가해지는 하중 허용치를 연구조사하였다. 또한 Patrick 등은 Sled 시험을 통하여 인체의 머리, 흉부 및 무릎부위의 충돌하중을 하중계의 부착으로 측정하므로써 인체의 허용 하중기준을 연구하였다. 조사결과 에너지 흡수식 조항장치를 개발할 필요성을 인식하게 되었다. 에너지 흡수식 칼럼은 차체구조물이 변형과정을 통해 에너지를 흡수하기 이전에 칼럼에 가해지는 하중을 제한하는 장치이다. 그러나 인간의 허용한계를 구체적으로 연구하지 않은 상태였기 때문에 설계된 항복하중이 실제보다 높은 상태이었다. 그 후 인체에 대한 연구를 본격적으로 한 결과 Wheel Hub로부터 흉골에 가해지는 최대 하중은 336kg, 어깨나 가슴에 대한 칼럼의 압축분포하중은 816kg 이하임을 알게 되었다. 이러한 하중치는 몸통의 하중 허용기준으로 사용되고 있다.

3.3 압축 허용기준 (Compression Tolerance Criterion)

그러나, 사체에 대한 충돌연구실험을 한 결과 전신 감속도 기준 및 하중 기준으로는 흉부 충격한계나 내부기관의 상해위험을 적절히 설명할 수 없음을 알게 되었다. 왜냐하면, 변형성있는 신체에 가해지는 힘은 몸통에 대

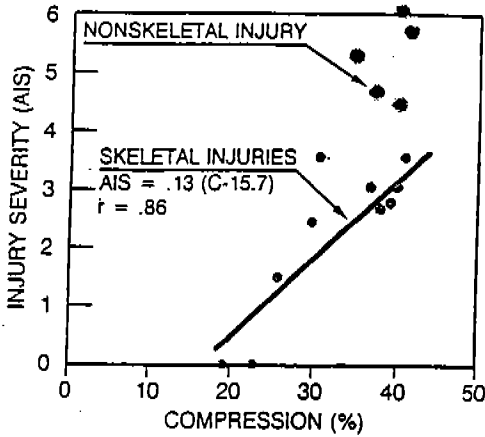


Fig.2 Severity of injuries as function of maximum chest compression for impacts of human cadavers

한 압박력과 자중에 의한 가속도가 동시에 발생하기 때문이다. Kroell의 실험에서 흉부 척추(Thoracic Spine)의 최대 가속도값은 상해를 예측하는데 부적절하며 오히려 최대흉부의 압축량이 보다 우수한 판단기준이 된다는 것을 밝혔다(그림 2 참조). 많은 연구자들의 실험에 의하면 회복 가능한 흉부 압축량은 성인의 경우 약 8.8cm 정도라고 밝혔다. 또한 이들 데이터들은 인체모형을 개발할 수 있는 중요한 자료로 이를 시점으로 해서 오늘날 사용하고 있는 Hybrid III의 흉부개발까지 발전하게 되었다.

이로서 개선된 흉부의 구조 및 동적거동 특성을 가진 Hybrid III의 사용으로 각종 자동차 사고시 흉부의 상해를 크게 감소하는 유용한 충격 흡수 조향장치의 개발을 이룩할 수 있게 되었다.

3.4 점성 허용 기준 (Viscous Tolerance Criterion)

수년동안 인체의 부드러운 조직(Soft-tissue)에 대한 부상역학을 조사한 결과 신체를 강체구조로 해석해서는 안되며, 전신 가속에 대한 부상기준 또한 위상위험을 예견하는데 부적합함을 알게 되었다. 대신, 신체는

변형가능한 구조이며 저속(초속 5m/sec 이하, 18kph) 상태에서 가슴뼈 허용치 및 충돌부상 위험은 압축기준을 사용해서 얻을 수 있다. 이 기준은 전방충돌시 안전띠를 착용한 승차자에게 특히 적용할 수 있다. 그러나 안전띠를 착용하지 않은 경우와 측면충돌시와 같은 고속(초속 5m/sec 이상) 흉부압박 상태에서는 최대압축기준은 흉부의 점성특성 및 부드러운 조직의 부상기준으로는 적합하지 않다. 그림 3은 흉부의 압축이 충돌속도에 따라서 상해에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

Viano 등은 신체의 부드러운 조직에 대한 점성 허용기준의 개념을 도입하였다. 즉, 변형속도(V) 및 압축(C)과의 관계성을 $VC = [V(t) \times C(t)]$ 로 정의하고, '흉부의 점성응답'이라고 한다. 이를들면, 가슴을 변형을 5m/sec로 50% 압축할 때 견딜 수 있지만 변형율을 20m/sec로 늘이면 견딜 수 있는 정도는 20%로 감소하게 된다. 따라서 V와 C의 곱의 최대값을 통해 부상위험 한계점을 예상할 수 있다. 이 VC_{max} 값을 시스템의 최대 점성응답이라고 한다.

생체역학 연구의 주목적은 이미 설정된 하중분산 원리 및 에너지 흡수원리를 사용해서 인체를 어떻게 가장 잘 보호할 수 있는지에 대한 응답치 및 허용치를 정량화 하는 것이다.

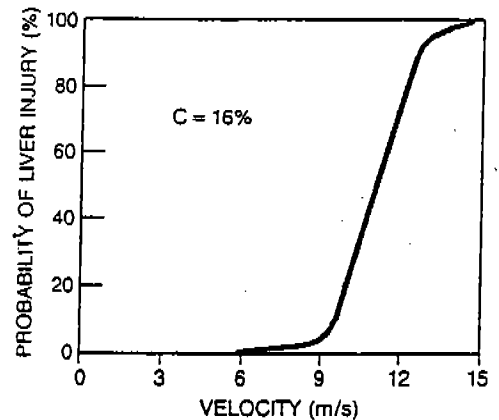


Fig.3 Risk of severe liver laceration as a function of velocity

4. 승차자 보호 기술 (Occupant Protection Technology)

승차자 보호를 위한 이론 및 적용방법은 다음의 3가지로 집약된다.

- 1) 자동차 충돌성능(Crashworthiness)
- 2) 적합한 내장(Friendly Interiors)
- 3) 구속장치(Restraint System)

이들 각각은 독립적으로 작용하지만 이 모든 것이 하나의 안전시스템으로 결합되면 더 많은 효과를 얻을 수 있다.

4.1 자동차 충돌성능(Vehicle Crashworthiness)

1930~1950년대, 자동차 안전기술의 초기 시대에는 정면충돌 및 차량전복시 승객이 승객석 내에 머무를 수 있는 구조적인 면만 강조하였다. 그후 1960년대 부터는 차량전방구조가 에너지를 흡수할 수 있는 찌그러지는 구조(Crushable Structure) 개념이 대두되면서 자동차의 찌그러지는 구조가 승객의 생존공간을 확보하는 동시에 충돌에너지를 흡수하는 동안 승객실의 정지시간 및 거리를 길게 함으로써 승차자에게 미치는 충돌가속도를 감소시켜 상해치의 개선효과를 얻을 수 있다. 전방 끝부분의 구조를 승객석과 고립시킴으로써 승객주위로 뚫고 들어오거나 변형되는 현상을 개선할 수 있게 되었다. 이와같은 1차 충돌을 저지하는 방법이 현재의 자동차 승객 보호 시스템 전체에서 큰 부분을 차지하고 있다.

4.2 부드러운 내장(Friendly Interiors)

구속되지 않은 승차자는 정면충돌에 의한 감속도로 인해 자동차 내부에 부딪히게 된다. 이 "2차 충돌"이 진행되는 동안 안전띠를 착용하지 않은 승객은 자동차의 충돌전의 속도로 전방으로 이동해서 차량의 내부와 부딪히게 된다. 이러한 현상을 에너지 흡수성이 좋은 내부재질을 통해 승객에게 미치는 충돌가속도를 최소화 할 수 있다. 에너지 흡수 개념은 승차자의 속도변화 시간을 가능한한 길

게 해주고(승차자가 부딪히는 물체의 변형을 통해 승차자가 정지하는 거리를 증가시키는 방법으로) 변형된 구조가 승객쪽으로 되돌아 오지 않을 뿐 아니라 영구변형 되거나 아주 천천히 회복되도록 한다. 그렇지 않으면 충격에너지는 승객에게 전달되고 구조물에 흡수되지 않는다. 다음은 그 예를 적용한 경우이다.

가. 에너지 흡수식 조향장치(Energy-absorbing Steering System)

에너지 흡수식 조향장치의 필요성은 운전자의 흉부상해 및 구속되지 않은 흉부가 조향축에 부딪힐 때 이를 안전하게 감속시키는 연구의 결과로 부터이다. 기본개념은 조향칼럼을 갈비뼈가 크게 부러지지 않을 정도의 규정된 하중에서 찌그러지도록 설계하는 것이다. 참고로 미국의 FMVSS 203 법규는 15mph(23.1kph)의 속도로 Body Block의 흉부로 조향장치에 충격을 가할 때, 1,134kg 미만의 하중값이 나와야 한다고 규정하고 있다.

그 결과 운전자의 정지거리를 증가시켜 주고 몸통감속도 및 충격흡수 에너지를 감소시켜 주게 된다. 이 장치는 1967년에 도입되었으며, 시스템의 구성은 압축성 불-슬리브 칼럼, 하중분포 강도가 개선된 조향 휠, 충돌시 엔진부의 밀려들어옴으로 인한 조향시스템의 후방이동을 감소시키기 위한 Anti Intrusion Mounting 브라켓 등으로 구성되어 있다. 미국 NHTSA 조사에 의하면 이 장치의 적용 이후 운전자 치명상의 12%, 조향장치로 인한 사상자 수의 38%가 감소되었다.

나. 고-내관통성 전면 유리창(High-Penetration-Resistant Windshields)

1960년대 초기까지만 해도 전면 유리창으로 인한 얼굴의 열상이 심각했었다. 이 당시의 전면 유리창은 안·막 유리 사이에 얇은 플라스틱 층(0.38mm)을 코팅한 것이었다(Laminated Glass). 그 후 공학 및 의학 전문가들의 협력하에 충돌을 견디며, 두부의 정지거리를 증가시키며, 그 충격 속도에서도 머리가 유리를 관통하지 않는 Laminated 유리가 개발되었다. 이때부터 GSI(Gadd Severity

Index) 및 HIC (Head Injury Criterion)와 같은 두부 상해치 개념이 도입되었다. 즉, 두부의 상해정도는 두부가속도의 2.5승과 충격시간과 관계성이 있음을 알게 되었다. 미국 NHTSA 조사에 의하면 전면충유리로 인한 얼굴의 열상 및 부상이 70% 감소되었다. 보다 최근에는 전면충유리 내부표면에 폴리우레탄 (0.51mm) 코팅을 해서 얼굴에 열상이나 두피가 벗겨짐을 방지해주고 있다.

4.3 구속장치 (Restraint Systems)

비록 충격흡수식 구조 및 하중분산 표면을 통한 내부안전이 충돌시 승차자 보호효과가 많더라도 고속 충돌시 안전하게 승객을 감소시키기에는 불충분하다. 의심할 여지없이 자동차의 속도변화에 비례해서 사상의 위험은 커지게 마련이다(그림 3 참조). 저속에서는 부상의 위험이 적지만 35mph 이상에서는 안전띠를 착용하지 않는 승객의 50%가 중상을 입으며, 25%가 사망에 이르게 된다. 그러나 3점식 안전띠를 착용한 승객의 경우는 고속 충돌 속도를 제외하고는 사상이 상당히 낮게 나타나고 있다.

가. 좌석안전띠

정면충돌시 3점식 안전띠를 착용한 승객은 Ride-down 효과를 얻게됨으로써 2차 충돌을 상당히 감소시켜줄 뿐 아니라 자동차 전복시에 방출위험이 없게 된다. 미국의 경우 안전띠 착용을 의무화 함으로써 자동차 충돌로 인한 사망자의 43%, 중상자의 40~70%가 감소되었다.

나. 에어백

에어백은 안전띠의 취약점을 보완하기 위해서 개발되었다. 사고발생 초기에 센서에 의해 충격파형을 감지해서 공기주머니가 부풀어지게 되고 이로 인해 승객이 Ride-down 효과와 하중분산 효과를 얻어서 안전을 도모하는 장치이다. 현재 수많은 자동차업체에서 에어백 개발을 위해 많은 노력을 기울이고 있는 상태이다.

4.4 충돌시 승객보호의 복잡성 및 한계성

위와 같이 충돌시 승차자 보호를 위한 여러 장치가 개발되었더라도 앞으로 해결하기 어려운 문제 및 해결할 수 없는 문제가 있다. 특히 매우 가혹한 시험조건에 적합한 에너지 흡수식 구조는 고속 충격시 상해를 효과적으로 감소시켜 주지만 저속충돌시에는 오히려 부상의 위험이 늘어나게 된다.

에너지 흡수식 조향 시스템도 위와 같은 딜레마가 있다. 만일 고속충돌시 안전띠를 착용하지 않은 승차자의 가슴에 최대 허용하중으로 조향시스템에 부딪히게 되면, 보다 단단한 구조에 Bottoming out 없이 충돌을 조절하고 에너지를 흡수하기 위해 최대강도가 있으면 유리하다. 그러나 저속충돌시에는 보다 더 부드러운 조향칼럼이 운전자에게 더 적은 힘을 가하게 되고 따라서 뼈가 부러지지 않게 되거나 타박상이 일어나지 않게 된다.

이와 같이 고속충돌시 중상을 감소하기 위한 시스템은 저속충돌시에는 오히려 불리한 경우가 발생한다. 만일 100건의 중상충돌시에 50%의 부상감소가 있다면 1000건의 저속충돌시 5%의 부상이 증가하게 된다. 실제 충돌데이터에 의하면, 조향장치 및 내부접촉에 의한 상해수준은 전방충돌 가혹성은 전범위에 균등히 분포되어 있다. 이와같이 복잡한 상황으로 승차자 보호시스템을 시험하기 위해 실험실식 충돌시험등으로는 실제상황의 안전성능을 판단하기 위한 정보로는 한계가 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

국내 자동차 사고로 인해 연간 12,000여명이 사망하고 30여만명이 부상을 입고 있다. 비록 대부분의 부상자는 회복이 되지만 상당수는 불구자 또는 회복불능 상태로 된다. 대부분의 불구자는 두뇌 및 척추손상을 입은 경우이다(부상순위: 머리: 45%, 얼굴: 10.5%, 몸통: 19%, 복부: 7.5%, 척추손상: 6%,

골반: 1%, 팔다리: 5%, 기타: 6%). 이와 같이 자동차 사고로 인해 입게되는 사상자에 대한 병원비, 인력손실, 사상자 및 가족들의 심적, 물질 피해 또한 막대한 상황이다.

그러나 아직도 일반인들은 자동차 사고 위험에 대한 인식이 낮은 상태이다. 이 위험을 잘 인식함으로써 안전띠 미착용, 음주운전 금지, 운전부주의로 등으로 인한 사고 피해를 방지할 수 있을 것이다. 또한 국가기관에서 소비자들에게 각 제작사의 승용차에 대한 상대적인 안전가능성을 측정해서 제공하고, 자동차 제작사에서는 더 높은 수준의 안전성이 있는 차량을 설계함으로써 시장력을 확보하는 노력이 있어야 하겠다.

그리고 향후 자동차로 인한 재산상, 인명피해를 줄이기 위한 다양한 접근법의 개발이 국가적 차원으로 여러 조직, 단체와 기관의 유기적 협조를 통해 이루어져야 하겠다.

참 고 문 헌

1. David C. Viano, "Cause and Control of Automotive Trauma", Bulletin of The New York Academy of Medecine. June 1988.
2. Jame R. Hankey "The Effects of FMVSS 208 and NACP on Safety as Determined from Crash Test Results", US DOT NHTSA, 1991.
3. CFR 49 FMVSS 203-Impact Protection for the Driver from the Steering Control System.
4. CFR 49 FMVSS 208-Occupant Crash Protection.
5. Ryoji Nakahama, Hiroshi Katho, "Safety on Relationship between Seat Belt Anchorage Location and Occupant Injury", Passenger Car Engineering Center Mitsubishi Motors Corporation.
6. Jeffrey A. Pike, "Automotive Safety-Anatomy, Injury, Testing and Regulation", SAE, 1990.