

샤프엣지 개선을 위한 해석적 리스크 검토법

남병군* · 박신희* · 김현섭*

CAE based risk prediction for sharp edge improvement

Nam, Byeung Gun*, Park, Shin Hee*, Kim, Hyun Sup*

Key Words : sharp edge (샤프엣지), major in plane strain (주평면 변형률), fracture criterion (파단기준)

ABSTRACT

In order to prevent the sharp edge during the side impact, a cause analysis and CAE based risk prediction were carried out in this study. It was found that sharp edge occurs mainly because of stiffness difference between the major parts and structural stress concentration. It could be improved by directly reinforcing the crack initiation region or by weakening the joints connecting the parts. The fracture criterion based on major in-plane strain was suggested and the risk prediction process for sharp edge prevention was established.

1. 서론

최근 측면충돌 시 도어트림(Door trim) 파단 사례가 빈번히 발생하고 있다. 도어트림 파단은 시험 편차를 유발하여 충돌성능 강건성을 저해함을 물론, 샤프엣지(Sharp edge)법규 불만족 사항으로 개선 시 추가 개발 비용을 발생시키고 때로는 양산 지연을 초래하기도 한다. 샤프엣지 리스크(Risk) 사전 점검을 위해 유압 충격기를 이용한 단품 평가를 실시하고는 있지만 주로 국부 충격시험에 국한되어 실차 충돌과의 정합성 및 신뢰성 측면에서 부족한 현실이다. 해석적으로도 도어트림 단품 또는 완성차 단위에서의 샤프엣지 현상을 검토하고 있으나 주로 문제발생 후 현상을 재현하고 개선하는 목적으로 수행 되어 왔다.

샤프엣지 발생 원인을 파악하기 위해서는 샤프엣지 다발 부위에 대한 구조 및 디자인적 특성에 대한 이해

가 우선 필요하다. 샤프엣지 발생 리스크 사전 예측 관점에서는 시험 및 해석 사례 분석을 통한 파단 메커니즘 이해와 도어트림 재질 특성에 부합하는 파단 기준(fracture criteria) 설정이 시급하다.

본 연구에서는 우선 도어트림 샤프엣지 발생 사례를 발생부위 및 유형별로 분류하여 파단원인을 분석하고자 한다. 또한 분석한 원인에 근거한 개선 방법을 제시한다. 그리고 도어트림 재질적 특성 및 파단모드 분석을 통해 파단 기준을 설정하고 해석적 사전 예측법을 제시하고자 한다. 즉, 면내주변형률(major in plane strain)⁽¹⁾에 기반한 파단 파라미터를 설정하고 시험과 해석결과에 대한 검증(validation) 작업을 통해 파단 기준치를 설정한다. 마지막으로 샤프엣지 리스크에 대한 해석 점검 프로세스를 제안하고자 한다.

* 현대자동차주

E-mail : bgnam@hyundai.com

2. 본 론

2.1 샤프엣지 발생 원인 분석 및 개선 대책

2.1.1 샤프엣지 범규

샤프엣지 관련 유럽범규(ECE R-95, 96/27/E)⁽²⁾는 “측면 충돌 시 실내장치 또는 부품은 날카로운 돌출물이나 톱니 모양의 모서리 형태가 되어 상해 위험을 현저하게 증가시키지 않아야 한다”라고 규정하고 있다. 북미를 제외한 내수, 중국, 호주, 칠레에서도 유사한 문구로 규정되어 있다. 측면 충돌속도는 50KPH이며 샤프엣지 적용범위는 Fig. 1과 같이 전석 및 후석의 더미 H-point 상부로 규정하고 있다.

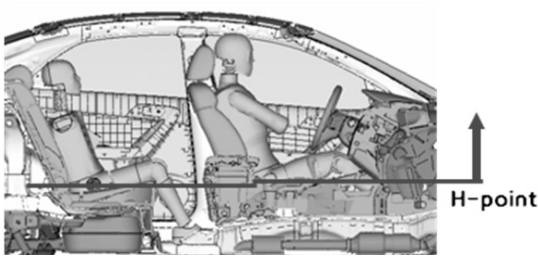


Fig. 1 A range of application for sharpe edge regulation

2.1.2 샤프엣지 다발 부위 및 구조적 특징

먼저 샤프엣지 사례를 발생 부위별로 분류하여 Fig. 2에 나타내었다. ①부위는 풀핸들(Pull handle) 또는 그립핸들(Grip handle) 하단부위로 풀핸들 및 풀핸들 마운팅과 같은 상대적 강성부품과 도어트림과의 강성차이가 큰 부위이다. ②부위는 맵포켓(Map pocket) 끝단부로 구조적으로 변형이 집중이 쉽게 발생하는 부위이다. 일부 차종은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 도어트림 캐릭터라인(Character line)과 맵포켓 끝단이 연결되어 있는 디자인적 특성을 가지고 있다. ③부위는 윈도우 스위치 하단으로 상대적 강성부품인 윈도우 스위치와 도어트림과의 강성차이가 큰 부위이다. 특히 장체에 준하는 윈도우 모터가 타격하는 부위이기도 하다. ④부위는 상대적으로 폭이 좁고 취성이 있는 가니쉬(Garnish) 부위이다. ⑤부위는 스피커 그릴 주변부로 보스를 통해 도어트림과 체결되며 다수의 강성립을 포함하고 있다. ⑥부위는 암레스트(Arm rest) 하단 부위로 도어트림과의 결합부에 다수의 보스가 존재하는 구조를 가진다. ⑦부위는 도어 임팩트패드(Impact pad)

부위로 사출패드 또는 폼패드(Foam pad)에 의해 도어 침입량이 많은 부위이며 패드가 체결되는 다수의 마운팅 구조를 가지고 있다.

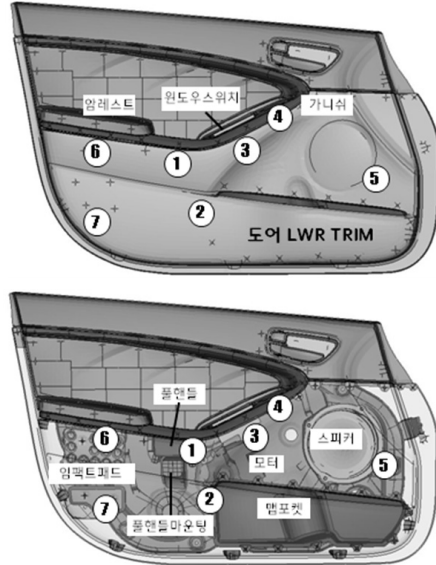


Fig. 2 Parts for frequent sharp edge

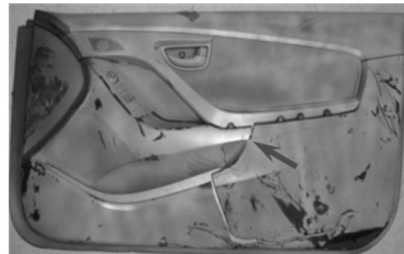


Fig. 3 A case of pull-handle part rupture



Fig. 4 A case of map pocket end rupture

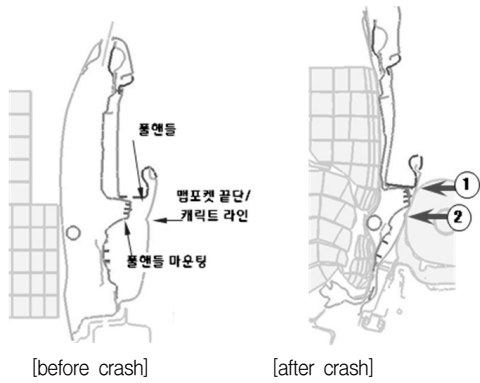


Fig. 5 Crash mechanism for pull handle and map pocket parts

2.1.3 사례를 통한 원인분석

Fig. 3은 A차종의 폴핸들 하단부의 샤프엣지 발생 사례를, Fig. 4는 B차종의 맵포켓 끝단부에서의 샤프엣지 사례를 보여주고 있다. 폴핸들 하단부 ①부위는 도어의 중심부에 해당하며 일반적으로 측면충돌 시 도어 침입량이 최대가 되는 부위이다. 충돌 시 해당부위를 기점으로 강한 굽힘 하중과, 배리어와 더미 사이에서 강한 압축하중을 동시에 받는다. 따라서 폴핸들 및 폴핸들 마운팅과 같은 강성부품과 로어트림과의 강성차이로 인해 강성이 약한 로어 트림부에서 파단이 발생하게 된다. 맵포켓 끝단부인 ②부위는 역시 도어 침입량이 큰 부위 중의 하나이며 구조적으로 응력 및 변형 집중이 쉽게 발생하는 부위이다. 특히, B차량은 도어트림 캐릭터라인과 맵포켓 끝단이 연결되어 파단 발생 후 크랙이 더욱 쉽게 전파되는 디자인적 특성을 가지고 있다. ①부위 및 ②부위는 도어 침입량이 가장 큰 도어 중앙부에 위치하여 특히 샤프엣지가 빈번하게 발생하는 부위이다.



Fig. 6 Window switch lower part



Fig. 7 Garnish part



Fig. 8 Speaker grill part

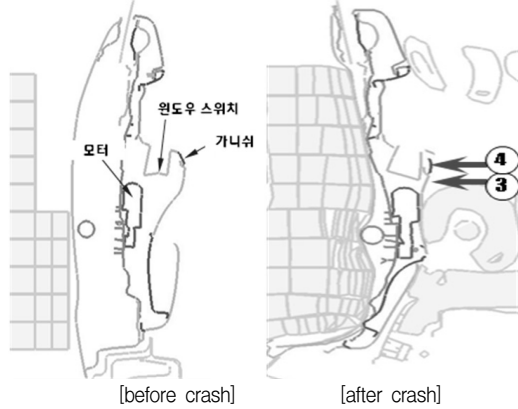


Fig. 9 Crash mechanism for window switch and garnish parts

Fig. 6은 C차종의 윈도우 스위치부 하단 파단, Fig. 7은 D차종의 가니쉬 파단, Fig. 8은 E차종의 스피커 그릴부 파단 사례를 보여준다. ③부위는 ①부위와 유사하게 윈도우 스위치와 같은 강성부품 하단에 상대적으로 강성이 약한 로어트림이 위치하여 파단을 유발하는 형태이다. 특히 윈도우 모터의 타격으로 파단은 더욱 심해질 수 있다. ④부위는 가니쉬 부위로 강성은 크나 상대적으로 취성이 강한 PC + ABS 계열의 재질을 사용하여 가니쉬 폭이 좁을 경우 취성 파단으로 이어질 위험이 큰 부위이다. 특히 보스 마운팅 부근에서 자주 발생한다. ⑤부위는 스피커 그릴부로서 그릴의 원주를 따라 파단이 발생하게 된다. 이는 스피커와 주변 보스 및 리브의 강성부족으로 기인한 것이다.

Fig. 10은 암레스트 하단부 및 암레스트 파단을, Fig. 11은 임팩트 패드부 파단 사례를 보여 준다. ⑥부위는 암레스트와 같은 상대적 강성 부품과 로어트림간의 강성차이로 두 부품을 연결하는 보스부에서 또는 강성이 약한 로어트림에서 파단이 발생한다. 경우에 따라서는 암레스트 자체가 파단되는 사례도 있다. 암레스트는 주로 PU계열의 재질을 사용하며 구조적으로도 로어트림에 비해 강성이 큰 관계로 다소 취성파단에 가까운 형태의 파단이 예상된다. ⑦부위는 도어 임팩트패드 부위로 임팩트빔 및 사출패드 등에 의한 강



Fig. 10 Arm rest part



Fig. 11 Impact pad part

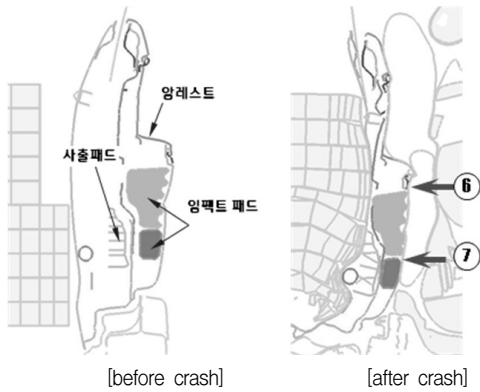


Fig. 12 Crash mechanism for arm rest and impact pad parts

한 타격으로 국부적으로 침입량이 크게 증대하는 부위이다. 주로 임팩트패드를 마운팅하는 연결부에서 파단이 발생한다.

2.1.4 샤프넷지 개선 방안

샤프넷지는 근본적으로는 도어트림의 고무함량을 증대하는 등 재질의 연성을 증대시키는 것이 바람직하지만, 원가 상승 및 기타 제반 문제로 인해 현실적으로는 어려운 부분이다. 파단발생 부위를 직접적으로 보강하여 강성을 증대시키거나, 파단부 주위의 체결부 약화를 통해 파단을 유도하여 도어트림의 파단을 방지하는 방법이 현실적인 대안일 것이다. 파단부위를 직접적으로 보강하는 방법으로는 Fig. 13과 같이 폴헨들부 하단 로어트림에 스틸 브라켓을 추가 하여 강성을 증대하여 파단발생을 억제하는 방법이 있다. 또한 크랙 발생이 예상되는 위치에 크랙 진전 방향에 수직한



Fig. 13 Impact pad part

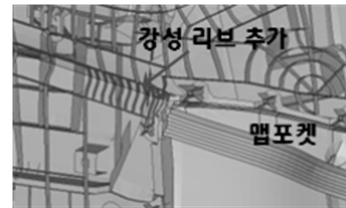


Fig. 14 Impact pad part

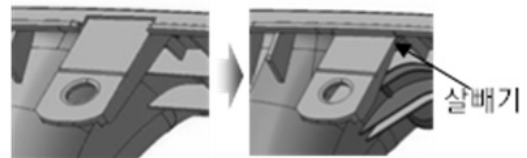


Fig. 15 Impact pad part

강성리브를 추가하는 방법이 있을 수 있다. Fig. 14는 A차종의 사례로 매포켓 끝단 전방으로 강성 리브를 추가하여 응력 집중부에서의 크랙 전파를 억제하는 사례를 보여주고 있다. 주변부 약화를 통한 파단 방지법으로는 Fig. 15에서와 같이 마운팅 보스부 살빼기 등을 통해 약화시켜 파단을 유도함으로써 로어트림이나 암레스트 등의 메인 부재의 파단을 방지하는 방법이다.

2.2 샤프넷지 리스크 방지를 위한 해석 검토법

전 절에서 설명한 개선방안은 샤프넷지 발생 후의 개선대책으로서 샤프넷지를 미연에 방지하는 근본적인 해결책은 되지 못하고 있다. 뒤늦은 개선대책으로 인해 추가 개발비용이 발생하거나 개발을 지연시키는 사례도 종종 발생하게 된다. 도면 출도 이전에 샤프넷지 발생부위를 예측하고 개선대책을 마련하는 것이 바람직하다. 본 절에서는 해석 본연의 사전 성능예측 기능을 활용하여 샤프넷지 발생 리스크를 사전에 예측하는 해석적 검토법을 제안하자 한다.

2.2.1 도어트림 파단 파라미터 및 기준 설정

파단 현상을 사전에 예측함에 있어서 파단 여부를 결정하는 지배 파라미터(governing parameter) 선정이 중요하다. 재료파단에 건디는 성질인 파괴인성치(fracture toughness)는 시편 시험을 통해 얻어지는 재료물성으로서 일반적인 금속재료는 관련 문헌에서 손쉽게 입수가 가능하나, 완성차 해석모델에서는 유한요소 메쉬 사이즈 등 현실적 문제로 적용이 힘들다.

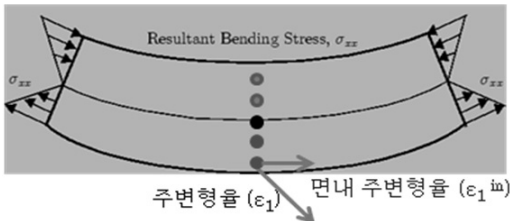


Fig.16 concept of major in plane strain

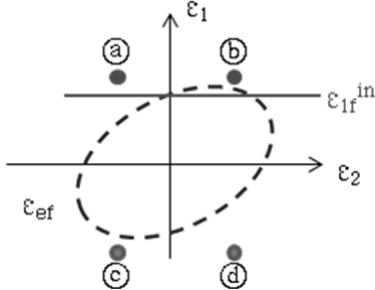


Fig. 17 Effective plastic strain and major in plane strain

더욱이 도어트림과 같은 고분자 재료에서는 시편 시험을 통해 파괴인성치를 구하는 것 또한 상당한 어려움이 있다. 대안적 방법으로 세라믹이나 고강도 복합재료 등 취성이 강한 재료는 응력에 기반한 파단 파라미터를, 연강 또는 고분자 재료에서는 변형률에 기반한 파단 파라미터가 주로 사용되고 있다. 파단 모드(fracture mode) 또한 중요한 인자로서, 파단을 발생시키는 주된 힘의 종류(인장력, 전단력, 압축력)와 힘의 작용면(plane)에 대한 명확한 구분이 필요하다.

도어 트림은 주로 PP수지에 TALC 계열을 함유한 고분자 재료로서 TALC 함량에 따라 다소 취성화 될 수는 있으나 기본적으로 상당히 큰 연신율을 가지는 연성재질이라 할 수 있다. 따라서 변형률 기반의 파단 파라미터를 사용하는 것이 바람직하다. 측면충돌 시 도어트림은 전영역에 걸쳐 굽힘 변형을 받으며 도어트림 두께 방향으로 최대변형 작용면에서 면내 인장력에

◆ *MAT_123 카드 사용

```
*MAT_MODIFIED_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (*MAT_123)
$HNAME MATS42350000PP(HT310_MS213-58 TYPE4)
① 1.4235000009.0000E-10 1600.0 0.31.0000E-04 0.0 1.85
100.0 100.0 42350000 1.0 ② 0.14 ③ 1.0 ④
```

- ① 도어트림 표준 물성 사용 (MS213-58)
- ② 파단 변형률 14%
- ③ 파단 편단 두께 방향 적분점 수 (ex. 5개의 적분점 중 1개가 fail되면 element elimination)
- ④ 표준 10mm 메쉬 사이즈 적용

Fig. 18 Material card for door trim rupture

의한 파단이 발생이 예상된다. 따라서 Fig. 16에서와 같이 파단 모드 관점에서는 주변형률(principal strain)이나 유효 소성변형률(effective plastic strain) 보다는 면내 주변형률(major in-plane strain)이 파단 파라미터로서 유효하리라 판단된다. 소성 파단 문제에서 파단 기준으로 통상 사용되어 지고 있는 유효 소성 변형률(ϵ_{ef})과 제안한 면내주변형률(ϵ_{1f}^{in}) 파단기준의 본질적 차이를 Fig. 17에서 주변형률 평면에서 비교하여 나타내었다. 임의의 변형률 상태에 있는 점 (a)~(d)을 생각할 때, ϵ_{ef} 기준에 의하면 청색 타원 밖에 존재하는 (a)~(d) 4점 모두가 파단 된다. 즉 주변형률 ϵ_1 이 압축 상태인 (c) 및 (d)점에서도 파단이 발생함을 의미하며 통상 플라스틱 재료의 파단 모드와는 맞지 않다. 반면 ϵ_{1f}^{in} 기준에 따르면 적색 실선 상부에 있는 주변형률이 인장상태인 (a)와 (b)점 2점만이 파단 되는 것이다.

면내 주변형률 기준 ϵ_{1f}^{in} 의 구체적인 수치를 결정함에 있어서, 시험적으로 플라스틱 재료의 동적 파단 변형률을 구하는 것은 쉽지 않은 일이다. 파단 변형률을 시험적으로 구하더라도 완성차 레벨의 해석모델에의 적용은 상당한 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 완성차 측면충돌 해석에 직접 적용을 목적으로 완성차 시험 및 해석간의 V&V (verification & validation)을 통해 ϵ_{1f}^{in} 을 결정하였다. 결과적으로 $\epsilon_{1f}^{in} = 0.14$ 로 결정하였으며, 그 도출 사례 및 유효성에 관해서는 다음 절에서 설명하기로 한다.

LS-DYNA⁽³⁾ 물성 카드 *MAT_MODIFIED_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (*MAT_123)을 사용하여 면내주변형률 기준을 Fig. 18과 같이 구체적으로 설정하였다. 현재 사용중인 도어트림 재질에 대해 표준 해석물성 및 표준 메쉬 사이즈를 사용하였다. 또한 두께 방향 적분점 파단 기준을 1로 설정하였다.

2.2.2 응력 컨투어를 이용한 간이 리스크 체크

본 절에서는 전 절의 면내주변형률 기준과는 별도로, 응력 컨투어(Contour)를 이용하여 샤프넷지 위험 부위를 체크할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

소성변형 특성상, 소성변형률은 시간이 경과함에 따라 하중이 감소하더라도 작아지지 않고 누적되어 나타나지만, 응력은 하중의 증감에 연동되어 반응하는 특성을 보인다. 즉, 도어트림에서 파단 리스크가 큰 부위들은 충돌 과정에서 일정 이상의 응력(인장강도 이상)을 지속적으로 받는 부위라고 할 수 있다. Fig. 19에서 시간이 경과함에 따라 (20, 30, 50msec) 응력이 소멸되거나 분산되지 않고 지속적으로 집중되는 부위는 ①과 ③ 부위이며 시험에서도 ①, ③ 부위에서 샤프넷지가 발생하였다.(Fig. 4 시험사례 참조) ②부위는 30msec에서 응력이 집중되기 시작하였으나 50msec에서는 응력이 주변으로 분산됨을 알 수 있다. 응력 컨투어를 이용한 본 방법은 파단여부를 결정하는 기준이라기 보다는 상대적 위험부위를 찾아내는 간이 리스크 체크법이다.

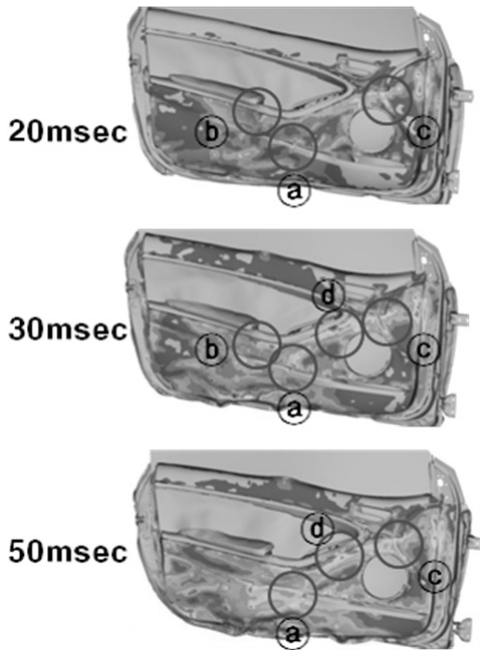


Fig. 19 Door trim stress contour

2.2.3 파단 기준치 설정 및 유효성 검증

본 절에서는 3차종의 측면충돌 시험 결과를 바탕으로 파단 기준인 면내주변형률 $\epsilon_{1F}^{in} = 0.14$ 를 도출한 해석사례를 소개한다. 시행 착오법으로 3차종의 파단 양상과 가장 유사한 해석결과를 보이는 면내주변형률 기준을 도출하였다.

Fig. 20은 맵포켓 끝단(①)과 스피커 주변부(③), 임팩트패드부(④) 파단 사례로서, $\epsilon_{1F}^{in} = 0.14$ 를 적용하여 해석한 결과 시험과 파단 위치 및 형태가 전반적으로

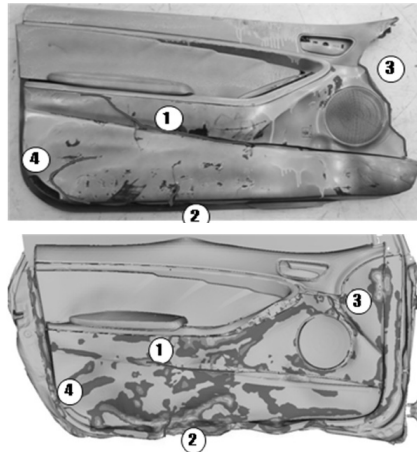


Fig. 20 Comparison between test and CAE (A vehicle)

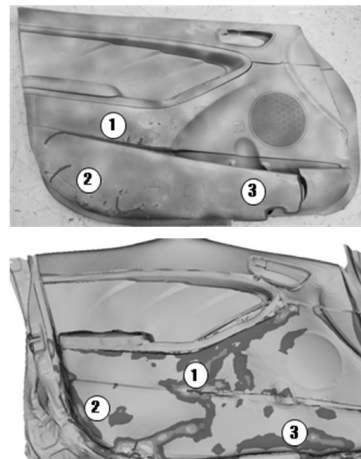


Fig. 21 Comparison between test and CAE (B vehicle)

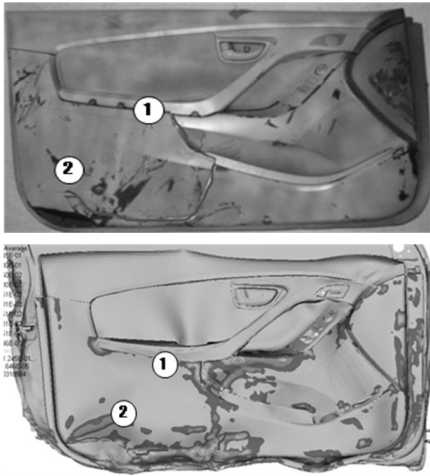


Fig. 22 Comparison between test and CAE (C vehicle)

유사하였다. 파단량은 전반적으로 시험대비 작으며 이는 10mm 메쉬의 영향으로 발생한 크랙이 진전하지 못하고 도중에 멈추었기 때문이다. 임팩트 패드부의 경우, 해석에서는 파단이 일어나지 않아 시험결과와는 다소 차이를 보였다.

Fig. 21은 맵포켓 끝단(①)과 임팩트패드부(②) 파단 사례로, 시험대비 해석결과가 전반적으로 파단 후 크랙 진전량이 작으나 파단 위치는 거의 일치함을 알 수 있다. Fig. 22는 풀헨들하단(①)과 임팩트패드부(②) 파단 사례로, 마찬가지로 시험과 파단 위치가 거의 일치함을 알 수 있다. 결과적으로 제안한 면내주변형률 기반 파단기준은 도어트림 파단 발생위치를 예측함에 있어서 충분히 유효함을 확인하였다.

2.3 샤프엣지 해석 점검 프로세스

제안한 파단기준에 기반한 해석 점검 프로세스를 다음과 같이 제안한다. 1) 내수, 유럽, 중국 진출 승용차량 중심으로 점검한다. (SUV 및 RV 차량은 특성상

샤프엣지 사례가 거의 없으므로 제외) 2) 점검 시기는 도어트림 설계가 안정화되는 L2 도면 이후로 한다. 3) 점검 방법은 응력 킨투어를 이용한 간이체크법과 면내주변형률 기반 파단기준을 동시에 수행하여 예측 정도를 높인다.

한편, 본 해석 점검 프로세스를 F차종에 시범 적용한 해석 결과, 풀헨들 하단 및 메인 트림 전단부에서 샤프엣지 리스크가 예측되었다. 설계적으로 강성리브 보강 등 설계변경을 하였으며 측면충돌 평가결과 샤프엣지가 발생하지 않았다.

3. 결론

본 연구에서는 측면충돌 도어트림 샤프엣지 발생 사례 및 메커니즘 분석을 통해 원인을 규명하고 면내주변형률에 기반한 해석적 사전 예측법을 제시하였다. 구체적으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 샤프엣지는 주요 부재간의 강성차이 또는 구조적 변형 집중부에 의해 주로 발생한다. 파단 발생 부위를 직접적으로 보강하거나 파단부 주위의 체결부를 약화시켜 도어트림의 파단을 개선할 수 있다.
- (2) 샤프엣지 사전 리스크 검토법으로서 응력기반 간이체크법과 면내주변형률 기반 파단 기준을 제안하고 점검 프로세스를 마련하였다.

참고문헌

- (1) Guofei Chen, Ming F.Shi, “Fracture Modeling of AHSS in Component Crush Tests”, SAE international 2011-01-0001, 2011.
- (2) ECE R-95 (UNECE) regulation
- (3) LS-DYNA Ver. 971 User’s Manual