

OECD 인증을 위한 농업용 트랙터 캐빈의 구조 해석

김현진* · 구남서+ · 권영두** · 하창욱*** · 정한경***

Structural Analysis of an Agricultural Tractor Cabin for OECD Certification

Hyun Jin Kim, Nam Seo Goo, Young-Doo Kwon, Chang-Wook Ha and Han-Kyong Jung

Key Words : Tractor Cabin(트랙터 캐빈), ROPS(Roll Over Protection System, 안전구조물), Finite Element Analysis(유한요소 해석)

ABSTRACT

A finite analysis of tractor cabin for ROPS design was performed. Finite element model was made to take account of the tractor cabin structures. Four tests were defined in OECD standard; (1) longitudinal loading (2) rear crushing test (3) side loading (4) front crushing test. The results of four independent analyses and sequential analysis are compared with test results.

1. 서 론

농업용 트랙터의 안전구조물(ROPS: Roll Over Protection System)은 트랙터가 전복되었을 때 운전자를 보호할 수 있도록 설계되어야 한다. 특히 수출용 트랙터의 경우 OECD의 엄격한 안전구조물 통과조건⁽¹⁾을 만족시키기 위해 수 차례 시험을 통해 통과조건을 만족시켜 왔다. 하지만 시험 시 통과조건을 만족시키지 못할 경우 트랙터를 다시 제작해야 하며 이때 제작경비 및 제작시간의 낭비를 피할 수 없게 된다. 따라서 이러한 경제적 및 시간적 낭비를 최소화하고 시험조건을 만족하는 구조물을 설계하기 위해 유한요소해석 이 필요하다.

본 연구에서는 트랙터 캐빈의 해석을 위해 MSC사의 Patran을 사용하여 모델링하여 Marc 2000을 사용하여 해석을 수행하였다.^(2,3) 일반적으로 설계는 개념 설계와 상세 설계로 나뉘어 수행된다. 보통 개념해석은 구조물의 전체 거동을 예측할 수 있는 간단한 식을 사용하여 해석하며 상세해석은

개념해석에서 어느 정도 확정된 설계를 바탕으로 유한요소 해석을 수행하게 된다. 따라서 본 연구는 상세 해석에 관한 것이라 할 수 있다.

해석에 사용한 트랙터는 대동공업주식회사에서 개발 중인 D450 트랙터이다. 안전구조물의 시험에서는 OECD규정의 시험인 (1) 종방향 변위 시험 (2) 후방 압괴 (3) 측방향 변위 시험 (4) 전방 압괴의 순으로 시험을 수행한다. 해석 시에도 궁극적으로는 이 4가지 시험이 순차적으로 모사될 수 있도록 순차 해석을 수행하여야 하나, 모델 생성 시 편의를 위해 개별 해석을 수행하여 작성 모델의 타당성을 검증한 후 순차적 해석을 수행하였다.

정확한 해석을 수행하기 위해서는 사용된 재료의 물성치가 정확히 알려져 있어야 한다. D450 트랙터의 경우 4가지 재료로 이루어져 있으나 각 재료에 대한 물성치를 모두 찾을 수 없어 프레임 소재인 KS STKR41⁽⁴⁾의 물성치를 사용하였다.

개별 해석과 순차적 해석 결과를 비교하여 잔류 응력의 영향을 고찰하였으며 해석 결과를 실제 시험 결과와 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다.

2. 해석 절차

2.1 해석 모델

D450 트랙터의 안전구조물은 크게 프레임과 발

* 회원, 경북대학교 대학원 기계공학과
 + 책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학과
 E-mail: nsgoo@knu.ac.kr
 TEL: (053) 950-7314, FAX: (053) 950-6550
 ** 회원, 경북대학교 기계공학과
 *** 대동공업주식회사

판조합과 핸들조합, 펜더조합 등으로 구성되어 있다. 프레임은 형상이 가늘고 길므로 보요소로 모델링하였고 펜더 조합은 셸요소를 사용하였다. 발판조합과 핸들조합은 셸 또는 고체 요소를 사용하여 모델링하여야 하나 전체 하중 흐름과 모델의 크기를 고려하여 등가의 면적을 가지는 보요소를 사용하였다. 해석모델은 4232개의 절점과 3161개의 셸요소, 971개의 보요소로 이루어져 있다. Fig. 1에 해석 모델을 경계조건과 하중조건과 함께 나타내었다.

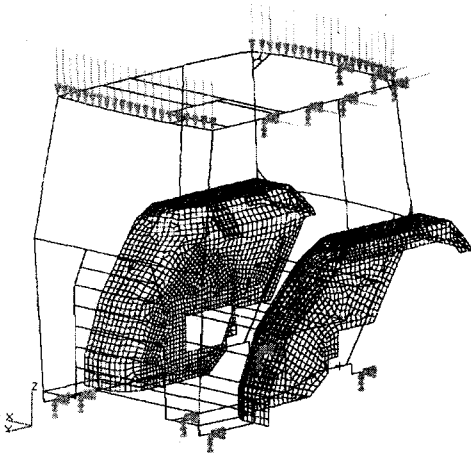


Fig. 1 Finite element model of D450 tractor ROPS

2.2 경계조건 및 하중조건

경계조건은 D450 트랙터의 안전구조물이 차체에 연결되는 부분을 고정하였다. 전방부의 4점과 후방부의 2점에 경계조건을 부가하였다. 실제의 고정부에는 방진 고무가 장착되어 있어 하중 부과 시 초기 변형이 유발된다. 현재 해석에서는 방진 고무의 역할을 고려하지 않아도 무방하므로 완전 고정, 즉 6개의 절점에 대해 변위와 회전을 모두 고정시켰다. 따라서 해석 결과를 시험 결과와 비교할 때는 고무 연결부 때문에 발생하는 강제 운동을 시험 결과에서 빼주어야 해석의 가정과 같게 된다.

하중조건은 변위 제어 시험과 압괴 시험에서 각각 다른 방법으로 부과된다. 즉 변위 제어 시험에서는 하중 부과점에 일정한 양의 변위가 계속 더해져 가해진다. 가해지는 변위는 에너지 요구 조건이 만족될 때까지 계속하여 증가하게 된다. 이와는 달리 압괴 시험에서는 부과 하중의 크기가 결정되어 있으며 이를 여러 단계에 걸쳐 부과하게 된다.

변위 제어 및 하중부과는 시험과 같은 순서와 방법으로 수행하였다. 개별해석에서는 변위나 하

중을 부과시키기만 하면 되는 반면 순차적 해석에서는 다음 시험을 위하여 부과된 변위나 하중을 제거하여야 한다. 이러한 변위나 하중의 제거가 수렴 시에 문제를 유발하였다.

2.3 재료 물성치

D450 트랙터의 안전구조물은 4가지 연강 재료로 이루어져 있으며 그 물성치가 유사하기 때문에 물성치가 알려져 있는 프레임용 소재인 STKR41(KS D3568⁽⁴⁾)을 사용하였다. STKR41의 탄성계수는 207GPa, 프아송비는 0.3이며 항복응력은 245MPa, 파단응력은 400MPa이다.

소성곡선은 다음과 같은 지수함수 형태로 나타내었으며 정확한 소성 물성을 구하기 어려워 연강 재료인 AISI 100와 1018의 중간값인 $\sigma_0 = 595\text{MPa}$, $m = 0.29375$ 을 사용하였다.

$$\sigma = \sigma_0 \epsilon^m \quad (1)$$

2.4 해석 순서

2.4.1 개별해석

순차적 해석을 수행하기 전에 각 시험에 대한 개별적인 해석을 수행하였다. 종방향 및 측방향 변위 제어의 경우 안전구조물의 후부와 측부에서 변위를 가하고 이때 하중을 가하는 지점에서 발생하는 반력을 구해서 에너지 요구 조건의 만족 여부 및 안전준의 침해 여부를 확인한다. 종방향과 측방향에서 만족시켜야 하는 에너지는 다음과 같다.

- 종방향: $1.40 \times 1915 = 2681(\text{J})$
- 측방향: $1.75 \times 1915 = 3351.25(\text{J})$

트랙터의 하중이 1915kg이므로 에너지는 $1.4 \times 1915 = 2681(\text{J})$ 을 만족시켜야 한다. 변위와 반력의 그래프에서 그래프의 하부면적이 에너지가 되므로 이를 이용하여 목표한 에너지에 도달하는지를 계산하였다. 시험에서 변위를 제어하는 것과 같은 방법으로 트랙터 후부 상부프레임에 측면으로부터 안전구조물 윗면 폭의 1/6만큼 안쪽으로 떨어진 곳에서 380mm의 폭의 절점에 변위를 제어하였다. 종방향으로 5mm씩 에너지 조건을 만족시킬 때까지 변위를 증가시켰다. 변위를 제어하는 절점에서 발생하는 반력을 각 단계에서 구하고 이를 이용하여 에너지를 계산하였다.

측방향의 경우 만족시켜야 하는 에너지는 $1.75 \times 1915 = 3351.25(\text{J})$ 이 된다. 시험과 같은 방법으로 종방향 변위 시험 시 변위를 가한 트랙터 측부 상부 프레임에 대해서 좌석기준점보다 앞쪽으로

300mm 전방의 위치에서 약 700mm의 폭의 변위를 제어하였다. 측방향으로 5mm씩 에너지 조건을 만족시킬 때까지 변위를 증가시켰다.

후방 및 전방압괴의 경우 후방 상부프레임과 전방 상부프레임에 대해서 수직방향으로 분포하중을 가한다. 후방과 전방압괴시 만족시켜야 하는 최종하중은 후방과 전방 모두 38300N으로 같다.

해석시에는 10회에 나누어 38300N을 가할 수 있도록 분포하중을 계산하였으며 각 단계별로 일정한 하중이 더하여 가해지도록 하였다.

2.4.2 순차적 해석

개별 해석후 순차적 해석을 수행하였으며 시험에서와 같이 종방향, 후방압괴, 측방향, 전방압괴의 순서로 순차적 해석을 수행하였다. 아직 Patran과 Marc의 호환성이 완전하지 않은 이유로 순차적 해석에서는 입력 데이터의 수정이 필요하였다.

종방향 및 측방향 변위제어의 경우 에너지조건을 만족시킨 후 변위를 제어하는 힘을 제거시키면 프레임은 스프링백 현상을 일으키게 된다. 이때 잔류변형과 잔류응력이 프레임에 남게 되며 이는 다음 순서의 해석에 영향을 미치게 된다. 이러한 상태를 해석하기 위해 변위를 제어하는 힘을 제거시킬 때 'RELEASE NODE' 옵션을 사용하였다.

'RELEASE NODE' 옵션은 경계조건을 그대로 유지하면서 하중이 가해지는 절점의 반력을 0으로 만드는 명령으로 잔류변형과 잔류응력이 남는 현상을 해석할 수 있다. 하중의 감소를 자동적으로 수행하는 'AUTO LOAD' 옵션을 함께 사용하여 점차적으로 반력을 줄였다.

후방 및 전방 압괴에서는 수직방향으로 하중을 가해 최종하중에 도달한 후 반대방향으로 수직하중을 가해서 최종하중을 0으로 만드는 방법을 사용하였다. 변위제어와 마찬가지로 하중이 갑자기 0으로 줄어들 경우 수렴하기 어려운 경우가 발생한다. 따라서 하중의 크기를 점차적으로 줄였으며 늘리고 미소한 최종하중 남김으로써 수렴성을 높이는 수정이 필요하였다.

3. 시험

해석 결과와 비교하기 위하여 대동공업주식회사의 시험 장비를 사용하여 ROPS 시험을 수행하였다. 종방향 및 횡방향의 변위 제어 시험에서 가해진 하중과 하중점의 변위를 계측하였다. 압괴 시험의 경우에는 안전구조물이 가해진 하중을 일정 시간 동안 견디는가는 확인한다.

4. 해석 결과 및 토의

4.1 개별해석 결과

종방향 변위시험의 경우 변위 부과점의 변위를 5mm 씩 증가시키면서 해석하였다. Fig. 2, 3에는 종방향 변위시험의 결과를 시험과 비교하여 나타내었다. 변위가 95mm일 때 목표에너지(2681J)를 만족시켰으며 안전존을 침범하지 않았다. 이때의 최대응력은 329MPa를 나타내었으며 하중이 완전히 제거된 후 잔류변위는 77mm, 잔류응력은 최대 279MPa를 나타내었다.

시험 결과를 보면 종방향 변위가 약 100mm일 때 에너지 조건을 만족시켰으며 이는 해석결과 95mm와 큰 차이를 보이지 않고 있다.

시험과 해석의 전반부 결과의 차이가 발생하는 데 이는 시험 시작부에서 구조물이 완전히 고정되기 전의 부분으로 고정되는 자리를 찾아가는 과정이기 때문이다. 아울러 정확한 물성치를 사용하면 해석결과가 시험치에 더 근접하게 될 것이다. 에너지 및 응력 도한 시험치와 비슷한 양상을 나타내었다.

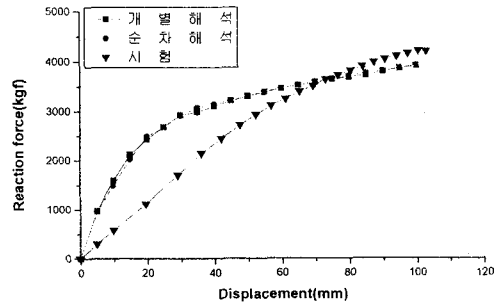


Fig. 2 Displacement-force diagram of the longitudinal loading

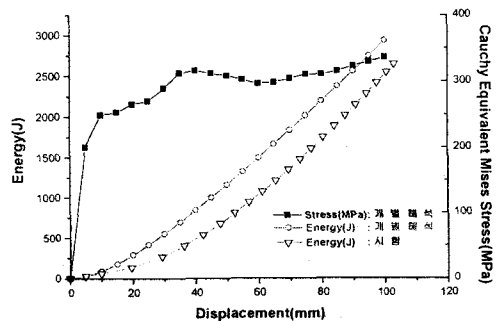


Fig. 3 Energy and maximum stress of the longitudinal loading

후방압괴의 경우 하중을 38300N까지 증가시키면서 해석을 수행하였다. 최대 변위는 상부프레임 가운데 부분에서 나타났으며 그 크기는 약 17mm, 최대응력은 265MPa를 나타내었다. 하중을 제거한 후에는 8.5mm의 잔류변위와 약 207MPa의 잔류응력이 나타난다.

측방향 변위 시험의 결과를 시험과 비교하여 Fig. 4, 5에 나타내었다. 측방향 변위가 약 140mm 일 때 목표에너지 3351.25J를 만족시켰으며 안전존을 침해하지 않았다. 이때의 최대응력은 325MPa를 나타내었다. 하중이 완전히 제거된 후 잔류변위는 최대 110mm, 잔류응력은 최대 241MPa를 나타내었다.

측방향 변위제어 시험결과는 실험과 전체적으로 비슷한 경향을 보이고 있다. 하지만 종방향 변위제어 시험에서와는 달리 변형량이 클수록 불안정한 모습을 나타낸다. 이는 변위제어 영역이 종방향에 비해 측방향에서 훨씬 커서 전체적인 변형형상이 크게 나타나기 때문이다. 종방향 변위제어 시험에서와 같이 시험 초기부분에서 차이를 보이고 있다 에너지 및 응력선도에서는 시험에 비해 해석의 결과가 구조물이 좀더 강성이 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

전방압괴 시험의 경우 최대하중 38300N이 작용할 때 최대변위 및 최대응력은 상부프레임 가운데 부분과 상부프레임과 연결되는 모서리 부분에서 나타났으며 그 크기는 약17mm와 273MPa를 나타내었다. 잔류변형은 9.8mm, 잔류응력은 168MPa로 나타났다.

상세해석의 결과를 Table 1에 정리하여 나타내었다. 여기에서 M.S.(Margin of Safety)는 측정된 최대응력을 사용하여 구조물의 안전도를 나타내는 것으로 다음 식으로 표현된다.

$$M.S. = (\text{인장강도}/\text{최대응력}) - 1 \quad (3)$$

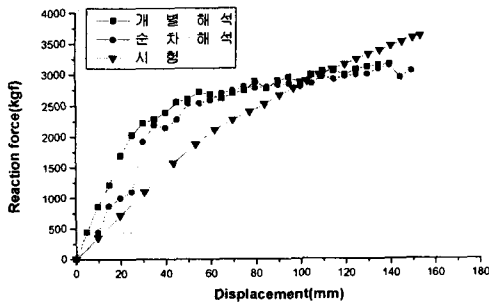


Fig. 4 Displacement-force diagram of the side loading

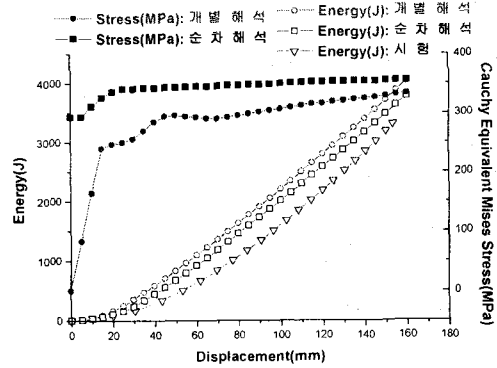


Fig. 5 Energy and maximum stress of the side loading

Table 1 Summary of the independent analysis

	안전존	에너지	응력	M.S.
종방향 변위제어	통과 (최대변위 : 95mm)	통과 (2681J)	329MPa	0.216
후방압괴	통과 (최대변위 : 17mm)	-	265MPa	0.509
측방향 변위제어	통과 (최대변위 : 140mm)	통과 (3351.25J)	325MPa	0.231
전방압괴	통과 (최대변위 : 17m)	-	373MPa	0.465

4.2 순차적 해석 결과

상세해석의 각 개별해석을 종방향 변위제어, 후방압괴, 측방향 변위제어, 전방압괴의 순서로 연속적으로 해석하였다.

종방향 변위제어는 순차적 해석의 첫번째 시험이므로 개별 해석결과와 차이가 없어야 한다.(Fig. 2,3 참조) 하지만 순차적 해석을 위해 입력 데이터를 연결할 때 수렴조건이 수정이 있었으므로 반력과 응력에서 약간의 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 에너지 및 응력의 경우는 차이가 없어 따로 구분하지 않았다. 에너지 조건을 만족할 때 최대응력이 334MPa로 개별해석에서의 329MPa과 약 5MPa의 차이가 나타난다. Fig. 6에는 최대 변형 양상과 그 때의 등가 응력을 나타내었다.

가해진 종방향 변위를 완전히 제거한 후의 최대 잔류변형은 78mm이며, 잔류응력은 282MPa로 개별해석의 279MPa과 미소한 차이를 보인다.

종방향 변위시험 후 잔류변형과 응력이 남아 있는 상태에서 후방압괴 시험을 수행한다. Fig. 7에는 최대 변형과 최대 등가 응력을 나타내었다. 최

대하중 38300N이 가해 질 때 최대변위는 78mm로 후방압과 시험 시작전의 78mm와 같은 값을 가진다. 이는 각 방향성분 변위의 합이 같은 것으로 실제 각 방향성분을 살펴보면 X방향 4.4mm에서 7.7mm, Y방향 77.8mm에서 75.9mm, Z방향 1.5mm에서 17.5mm로 수직하중에 의해 Z방향의 변위가 크게 증가했음을 알 수 있다. 하중이 가해질 때 최대 응력은 330MPa이며 수직하중이 모두 제거된 후 잔류변형과 잔류응력은 각각 77mm와 266MPa로 나타났다.

측방향 변위제어 시험에서는 개별해석에서 측방향으로 140mm에서 에너지 조건을 만족하던 것과 달리 150mm에서 에너지 조건을 만족시킬 수 있었다.(Fig. 4,5 참조) 이는 종방향 변위제어와 후방압과 시험을 거치면서 발생한 구조물의 변형과 잔류응력이 영향을 미쳐 구조물이 약해진 결과로서 측방향에서 흡수 할 수 있는 에너지가 줄어든 것이다. 개별해석보다 구조물이 약해졌지만 에너지 조건을 만족시킬 수 있는 결과를 얻을 수 있었으며 이때 최대 응력은 355MPa를 나타내었다. 하중을 제거한 뒤 잔류변형과 잔류응력은 각각 146mm와 319MPa를 나타내었다.

Fig. 5에 나타난 순차적해석 측방향 변위시험의 하중-변위선도는 개별해석과 비슷한 경향을 보이지만 시험 시작부부터 불안정한 모습을 보인다. 종방향 변위제어와 후방압과를 거치면서 구조물이 약해졌기 때문이다.

종방향 변위시험의 에너지 조건은 개별해석의 경우보다 더 시험과 같은 결과로 접근하였으며, 응력은 개별해석보다 높게 나타나지만 전체적으로 일정한 값을 나타내었다. Fig. 8에는 최대 변형 및 등가 응력을 나타내었다.

시험의 마지막 순서인 전방압과 시험에서는 최대하중 38300N이 가해질 때 최대변위는 155mm, 최대응력은 337MPa를 나타낸다. Fig. 9에는 최대 변형과 최대 등가 응력을 나타내었다. 전방압과에서 최대변위는 하중을 가한 부분이 아니라 상부프레임과 연결되는 전면프레임의 모서리에서 나타나는데 이는 측방향 변위제어 시험에서 잔류변형이 크게 나타났기 때문이다. 하중 제거후 최대 잔류 변형과 잔류응력은 각각 150mm, 302MPa로 나타났다. Fig. 10에는 잔류 변형과 잔류 응력의 분포를 나타내었다.

순차적 해석의 결과를 정리하여 Table 2에 나타내었으며 Table 3과 Table 4에는 개별 해석과 순차적 해석 결과를 비교하였다.

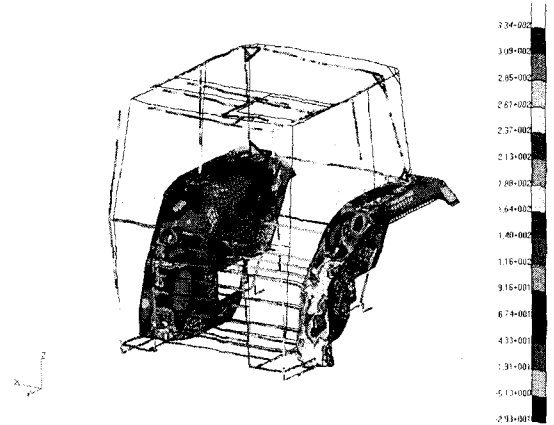


Fig. 6 Deformation and equivalent stress of maximum longitudinal loading

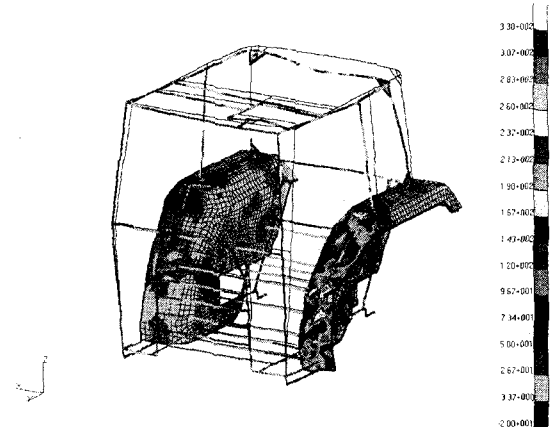


Fig. 7 Deformation and equivalent stress of maximum rear cruching loading

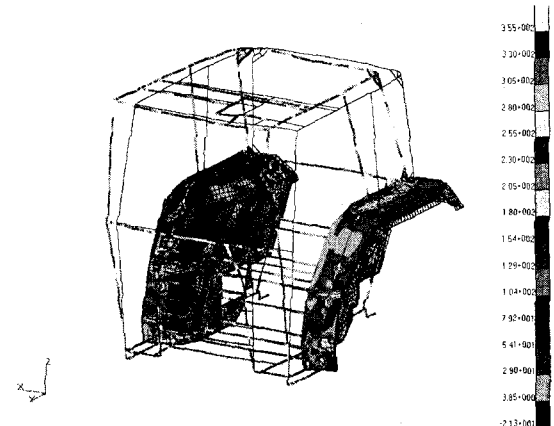


Fig. 8 Deformation and equivalent stress of maximum longitudinal loading

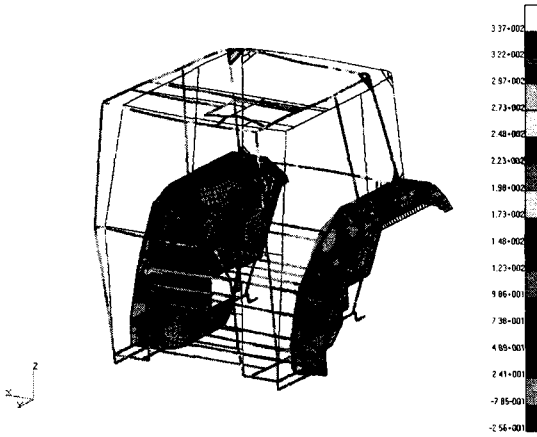


Fig. 9 Deformation and equivalent stress of maximum front crushing loading

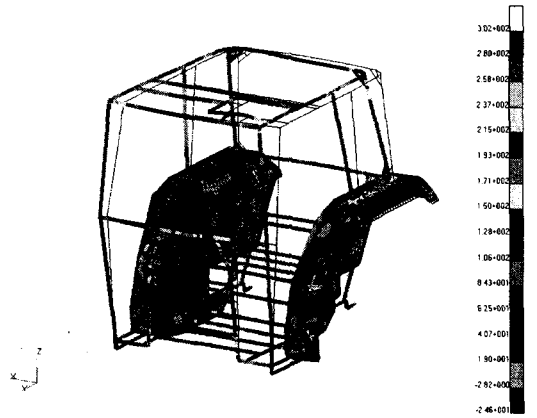


Fig. 10 Final deformation and residual stress after unloading

Table 2 Summary of the sequential analysis

	안전존	에너지	응력	M.S.
중방향 변위제어	통과 (최대변위 : 95mm)	통과 (2681J)	334MPa	0.20
후방압괴	통과 (최대변위 : 78mm)	-	330MPa	0.21
측방향 변위제어	통과 (최대변위 : 150mm)	통과 (3351.25J)	355MPa	0.13
전방압괴	통과 (최대변위 : 95mm)	통과 (2681J)	334MPa	0.20

Table 3 Comparison of the independent and sequential analyses (maximum values)

최대값		중방향	후방	측방향	전방
응력 (MPa)	개별	329	265	325	273
	순차	334	330	355	337
M.S.	개별	0.22	0.51	0.23	0.47
	순차	0.20	0.21	0.13	0.19
변위 (mm)	개별	95	17	140	17
	순차	95	78	150	155

Table 4 Comparison of the independent and sequential analyses (residual values)

최대값		중방향	후방	측방향	전방
응력 (MPa)	개별	279	207	241	168
	순차	282	266	319	302
변위 (mm)	개별	77	8.5	110	9.8
	순차	78	77	146	150

5. 결론

유한요소 해석을 통하여 트랙터의 안전구조물에 대한 해석기법을 정립하고 시험과 비교하여 D450 트랙터의 캐빈 설계가 OECD 규격을 만족함을 확인하였다.

개별 해석과 순차적 해석의 차이를 고려하였다. 궁극적으로 순차적 해석을 수행하여야 하지만 해석의 효율을 고려할 때 개별 해석으로 설계를 확정된 후 최종적으로 순차적 해석을 수행하는 것이 바람직하다.

아울러 정확한 물성치의 확보는 해석의 신뢰도를 높이는 데 필수적인 요소이므로 이에 대한 노력을 수행하고 있다.

참고문헌

- (1) OECD Standard Code for the Official Testing of Protective Structures on Agricultural and Forestry Tractors, 1993
- (2) Marc 매뉴얼 Version K7, 1997, Theory and User Information, Element Library, Program Input, User Subroutines and Special Routine, Demonstration Problems
- (3) Patran 매뉴얼 2000(r2), 2000, reference Manual Volume 1, 2, 3
- (4) KS 규격집, 1995
- (5) Joseph Datsko, 1996, Material Properties and Manufacturing Processes, pp. 21.