

배기가스 정화장치의 캐닝공정중 촉매 내부에 발생하는 응력분포에 관한 유한요소 해석

정연욱* · 이경식**

*세종공업(주) · **울산대학교 기계공학과

<요 약>

본 논문에서는 자동차용 배기가스정화장치의 canning 공정중 fixture의 형상에 의해서 주어지는 다양한 loading 조건하에서의 촉매내부에 발생하는 응력분포에 대하여 유한요소법을 이용하여 조사한다.

촉매의 단면은 대칭형상이므로 단면의 1/4 영역에 대해서만 해석하고, 촉매의 변형은 평면변형을 상태로 모든 하중조건하에서 촉매내부에 발생하는 전단응력의 값을 계산하였다. 곡률 반경이 서로 다른 2개의 윤곽선이 교차되는 부분에서 최대 전단응력이 발생하고 따라서 전단응력을 기준으로 파손을 판단한다면 이 부분에서 파손될 확률이 높음을 알 수 있고, 이는 실제현장에서 canning공정중 발생하는 촉매 파손양상과 일치한다.

Finite Element Analysis of Stress Distribution in the Catalyst during Canning Process of a Catalytic Converter

Y. W. Chung* · K. S. Lee**

*Sejong Industrial Co., Ltd. · **Dep't. of Mechanical Engineering

<Abstract>

Stress distributions in the catalyst of an automotive catalytic converter during canning process is investigated under various loading conditions with the finite element method.

Due to symmetry, quater part of the section was analysed, and the deformation was assumed to be in plane strain under all loading conditions considered in this study.

The maximum shear stress arises in the region where the two contours with different radius of curvature intersect. If the failure of catalyst is estimated with the maximum shear stress, the probability of the failure in those regions is high, and this result coincides with the failure mode during canning process in the manufacturing shop.

1. 서 론

배기가스정화장치(catalytic converter)는 그림 1에 나타난 바와 같이 큰 타원 모양의 촉매, mat, edge seal, inner cone 및 shell로 구성되어 있고 배기가스 구성 물질 중 CO, HC, NOx 등 인체에 유해한 가스를 산화 및 환원반응을 통해, CO₂, H₂O, N₂ 등으로 바꾸어주는 역할을 한다[1].

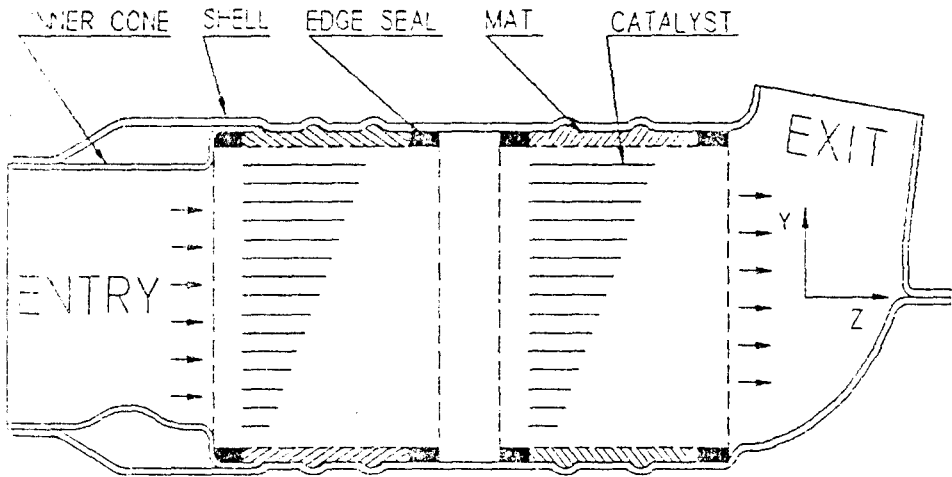


Fig. 1 Schematic diagram of automotive catalytic converter.

최근 들어 전세계적으로 엄격한 배기가스 규제 강화에 대응할 수 있고 제조원가를 줄이기 위하여 개선된 배기가스정화장치의 개발에 많은 관심이 집중되고 있다. 특히, 외국의 우수한 자동차 제조업체에서는 배기가스 정화장치의 핵심 부품인 삼원촉매(Three-Way-Catalyst)가 활성화되는데 걸리는 시간을 단축하여, 정화되지 않은 배기가스가 대기로 유출되는 양을 최소화하는 기술을 이미 90년대 초반에 개발 완료하여 실차에 적용하고 있다. 즉, 배기

가스정화장치를 자동차의 Floor 밑면에 장착하는 종래의 UCC (Under-body Catalytic Converter) 방식에서 배기 다기관 끝단에 부착시키는 CCC(Close-Coupled Catalyst Converter) 방식으로 전환하여, 강화된 배기가스 관련 법규를 만족시킬 뿐만 아니라, 초기 배기가스 정화능력을 향상시키고 있다. 이에 따라 국내 H자동차 회사와 협력업체인 S사도 1993년도부터 CCC 개발에 착수하여 1996년 초에 완료되어 4월부터 수출용 일부차종에 한하여 적용하고 있다.

그런데, 현재 채택하고 있는 CCC는 UCC에 비해서 고온, 고압, 고진에 견딜 수 있도록 Shell의 두께를 0.5mm 증가시켜야 할 뿐만 아니라, shell에 inner cone이 추가되고 고밀도 mat와 edge seal의 추가가 요구되고 있다. 또한, CCC방식의 배기정화장치를 실차에 장착할 때에는 자동차의 엔진에 관련된 부품과 간섭이 일어나는 것을 방지해야 하므로, 부품제작 시 제품의 단면적에 대한 조건과 단경방향의 길이에 대한 조건이 까다롭게 되었다. 그 뿐만 아니라, 차량이 정상운행 중일 때 mat의 열변형에 의하여 shell의 단경방향 변형이 최대 2.1mm에서 최소 0.6mm까지 부풀게 되므로, 정상운행 중에도 부품이 장착될 때와 마찬가지로 다른 부품과 간섭이 발생되지 않아야 한다. 따라서, 배기가스정화장치의 용접공정에 canning fixture의 사용이 요구되며, 이것을 이용하여 제품의 단경방향 길이를 허용범위 이내로 만들어서 배기가스 정화장치의 소손이나 엔진과의 간섭을 피하고 있다. 그런데, 이 fixture를 사용하면 제작공정에서 불명확한 원인에 의하여 촉매가 파손되는 문제가 자주 발생되고 있다. 예를 들면, 그림 2에 보인 fixture는 S사에서 종래에 사용되던 방식으로서, shell의 양쪽 플렌지 부위만 구속하는 fixture 이다. 이것을 이용하면 Shell의 중앙부위 변형이 최대 1.2mm (GBD:0.9g/cm³)에서 최소 0.4mm(GBD:1.07g/cm³)까지 부풀게 되는 문제점이 발생하였다. 따라서, shell과 촉매사이의 초기틈새 4.0mm와 이 변형량을 합하여 최대 5.2mm에서 최소 4.4mm까지 증가되므로, 최대허용틈새 4.5mm을 초과하게 된다. 이와같이 허용틈새를 초과하게 되면 mat의 침식내구성이 기하급수적으로 떨어져서, 제품의 내구 수명을 현저히 단축시키는 결과를 가져오게 된다.

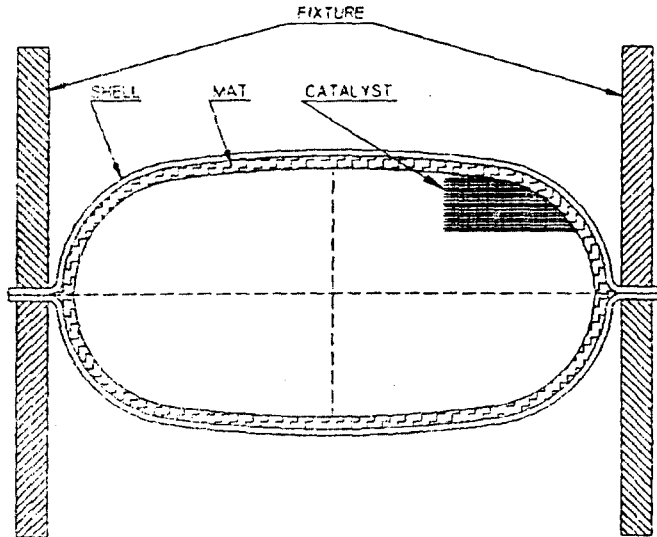
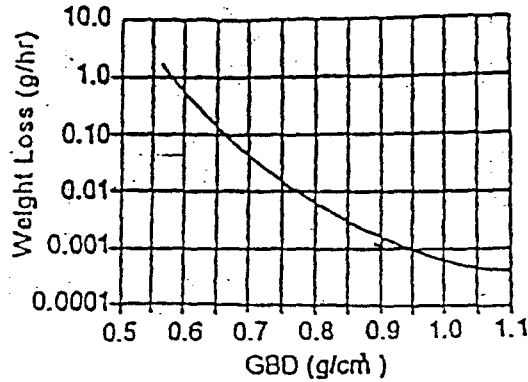


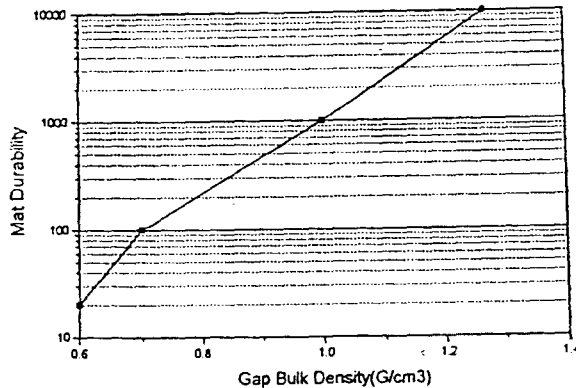
Fig. 2 Schematic diagram of the old canning fixture.

그림 3은 냉간 및 열간시 가속침식 시험결과를 나타낸다[3,5]. 이 그림에서 보면 GBD(Gap Bulk Density)값이 낮아질수록 mat의 침식내구성은 기하급수적으로 떨어져 mat 침식이 발생하는 제품불량이 발생한다. 이러한 문제점을 해소하기 위하여 그림 4와 같이 Shell 양쪽 플랜지 부위와 양측 면을 동시에 loading을 가하는 fixture를 개발하여, canning shell 변형을 최대 0.5mm (GBD:1.04g/cm³)에서 최소 0.2mm(GBD:1.12g/cm³) 까지 감소시켜 mat 침식을 방지하였다. 그러나, 이 fixture를 채택한 이후, 그림 5와 같이 촉매의 단경 방향으로 균열이 발생하거나 모서리 부분이 함몰되는 제품이 전체 생산량의 약 0.3~0.4% 까지 발생되고 있다.

따라서 본 연구에서는 용접공정에 이용되는 fixture의 형상이 촉매 내부의 응력분포에 미치는 영향을 유한요소법을 이용하여 해석하고, 해석된 결과를 바탕으로 fixture의 적절한 형상을 파악하여, 향후 fixture 설계의 기초자료로 활용코저한다.



(a)



(b)

Fig. 3 Erosion resistance vs. GBD at (a) accelerated cold test and (b) accelerated hot test

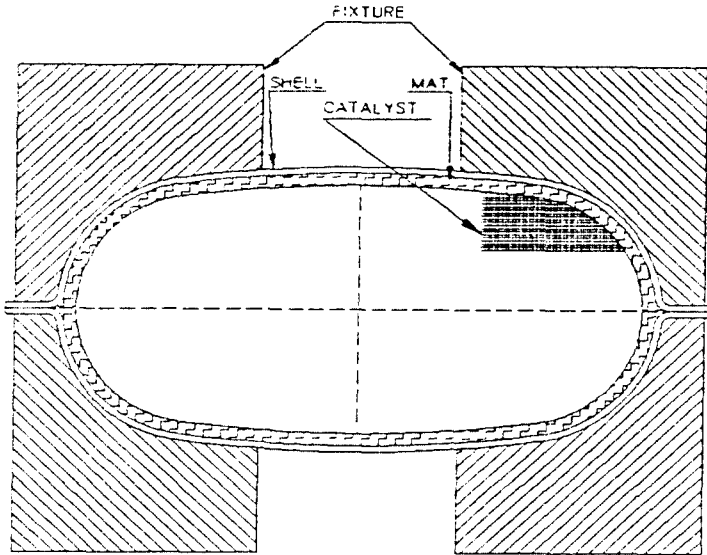


Fig. 4 Schematic diagram of the new canning fixture.

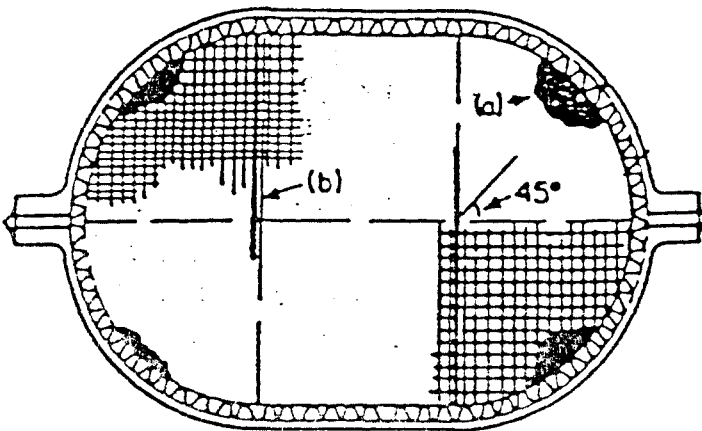


Fig. 5 Failure pattern of the catalyst during canning process ;
(a) crush, (b) shear failure.

2. 유한요소해석

2.1 문제 정의

그림1에 나타난 자동차용 배기가스 정화장치는 CO, HC, NO_x 등 인체에 유해한 가스를 삼원촉매(Pt, Pd, Rh)를 이용해서 산화 및 환원작용을 일으켜서 인체에 무해한 CO₂, N₂, H₂O 가스로 변환 시켜 주는 기능을 갖고 있다. 이 배기가스 정화장치는 그림 6과 같이 촉매를 mat로 둘러싸고 이를 한쪽 shell에 올려놓은 뒤 다른 한쪽 shell을 마주보는 방향으로 덮고 난 후 용접 fixture로 눌러서 shell의 플랜지 부분에 점용접과 seam 용접을 하는 과정을 거쳐 제작되어 진다. 실제 배기가스 정화장치를 canning하는 동안 촉매의 내부의 응력분포를 해석하기 위해서는 shell, mat, catalyst의 변형을 모두 고려해야한다. 이 경우 mat는 점탄성재료이고 그림 7에 나타낸 바와 같이 변형량에 따라 강도의 변화량이 매우크기 때문에 다루기가 까다롭다. 이뿐 아니라, 그림 6에서 볼 수 있듯이 제조과정중에 mat와 shell 사이의 마찰·접촉분제는 해석에서 고려하여야할 중요한 문제이다. 그러므로 canning 공정중 촉매내부에 발생하는 응력분포를 정확히 알기 위해서는 접촉과 재료의 점탄성거동을 고려하여 해석해야만 하므로 매우어려운 문제이다. 따라서 본연구에서는 촉매만을 해석 대상으로 하고 촉매에 작용하는 canning 압력의 변화에 따른 촉매 내부의 응력분포를 해석하고자 한다. 촉매는 등방성 선형탄성재료이고, 평면변형률 상태로 가정하여 해석하였다.

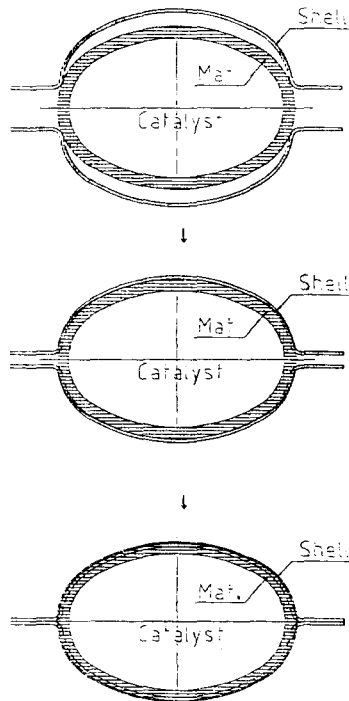


Fig. 6 Schematic diagram of the canning process.

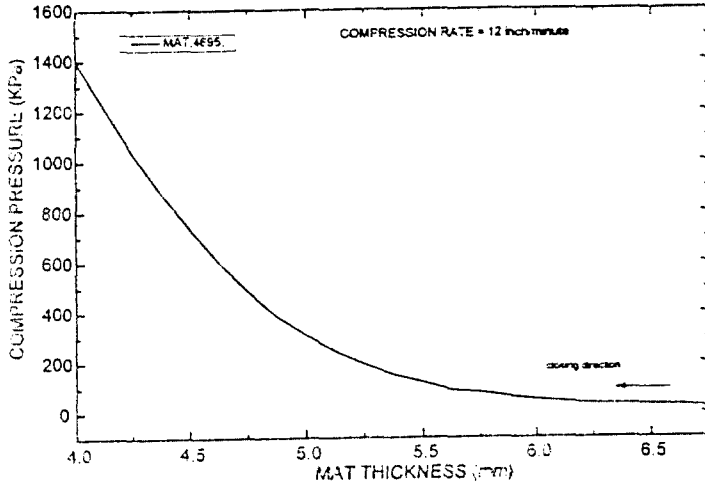
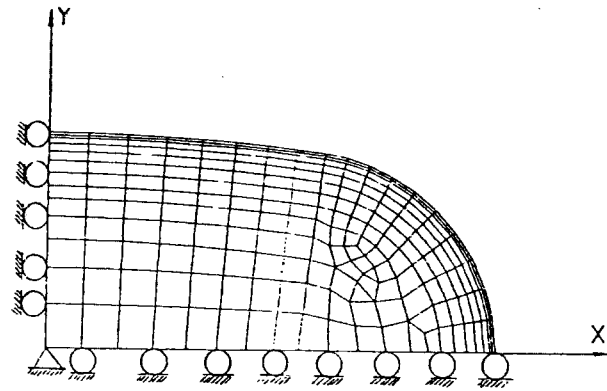


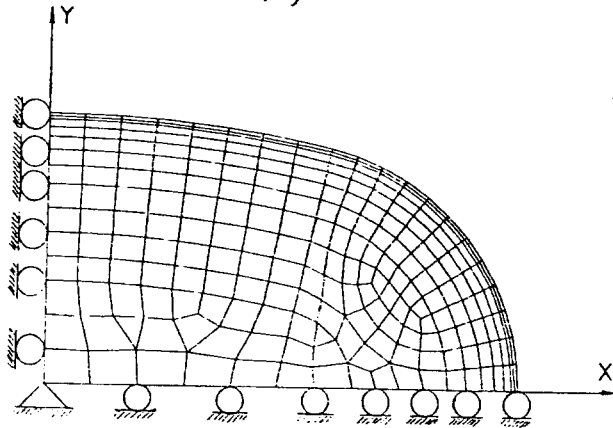
Fig. 7 Compression characteristics of the mat.

2.2 유한요소 모형

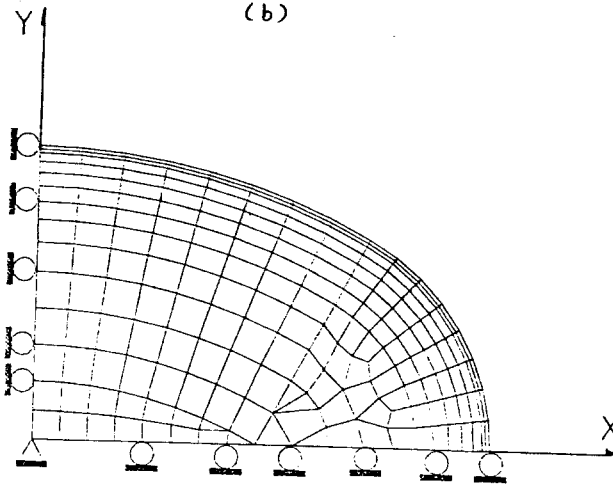
S사에서 현재생산중인 catalytic converter의 촉매형상은 racetrack형, wideoval형, oval형, 원형등 4가지이다. 이중 본연구에서는 원형을 제외한 3가지 형상의 촉매에 대한 유한요소모형을 작성하였다. 촉매의 횡단면은 상하좌우 대칭이고 하중도 대칭으로 작용함으로 유한요소 모형을 촉매형상에 따라 그림 8과 같이 1/4만을 해석대상으로 채택하여 촉매의 중심으로부터 횡방향으로 x축으로 두고, 종방향으로 y축으로 두었다. 촉매의 형상이 racetrack형은 요소수가 236, 절점수가 210개이고 wideoval형은 요소수가 261, 절점수가 235개이고, oval형은 요소수가 213, 절점수가 190개이다. 유한요소 모형에서 바깥쪽 2층의 요소는 촉매의 원재료인 cordierite 고유의 기계적 성질을 가지는 층이고 그 내부는 mesh 형태로 성형된 부분으로 cordierite 고유의 기계적 성질과는 다르다. 표 1에 cordierite와 mesh로 성형된 촉매의 탄성계수와 poisson 비로 나타내었다. 유한요소 모형에서 부위별 요소 밀도를 다르게 한 것은 이 만나는 부위와 중앙선을 기준으로 양측 45° 방향에서 촉매의 전단과 함몰이 빈번히 발생하기 때문이다. 구속조건은 1/4 모형만 해석대상으로 하였으므로 그림 8에 표시된 것과 같이 x축, y축에 접한 부분을 물러 구속조건을, 중심부는 힌지 구속조건을 주었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Finite element mesh for a (a)racetrack, (b)wideoval (c)oval type catalyst.

2.3 촉매에 작용하는 가압력

canning 공정중 촉매에 작용하는 가압력의 분포양상을 아래의 3가지 경우를 선정하여 해석하였다.

첫째, 그림 9와 같이 이상적인 경우로 canning 하는 동안 fixture의 가압력이 촉매 외곽 형상 전체에 균일하게 하중을 전달하는 경우로 균일분포하중으로 가정하였다. 이때의 작용 압력은 mat가 6.95mm에서 4mm로 압축될 때 미치는 압력이므로 그림 7의 압축시험 결과에서 압력 값을 구하여 $1400\text{kPa}(0.14\text{kg}/\text{mm}^2)$ 으로 하였다.

둘째, 그림 10과 같이 fixture의 형상이 shell의 flange 부위만 가압하는 경우 shell의 양측 면은 변형이 거의 없으나 중앙부위는 볼록하게 변형되므로 양측 면에서 먼저 mat와 접촉하면서 mat를 압축시켜 촉매에 압력을 전달한다. 따라서 촉매의 양쪽 측면에서만 비례적으로 가압력을 받는다고 가정하였고 압력의 크기는 $0.2\text{kg}/\text{mm}^2$ 에서 $0.5\text{kg}/\text{mm}^2$ 점진적으로 증가한다고 가정하였다.

셋째, 그림11과 같이 fixture의 형상이 shell의 전면을 구속하게 제작되어진 경우로 shell 전체에 걸쳐 변형이 거의 발생하지 않는다. 따라서, shell이 양쪽 측면에서 부터 mat을 먼저 가압하면서 비례적으로 양측 면을 가압하고 또한 중앙부위에도 전체적으로 균일한 힘을 가한다고 가정하였다. 이러한 가정은 촉매의 파손에 관한 몇몇 연구에서 취한 가정과 일치하는 것이다. [2.4]

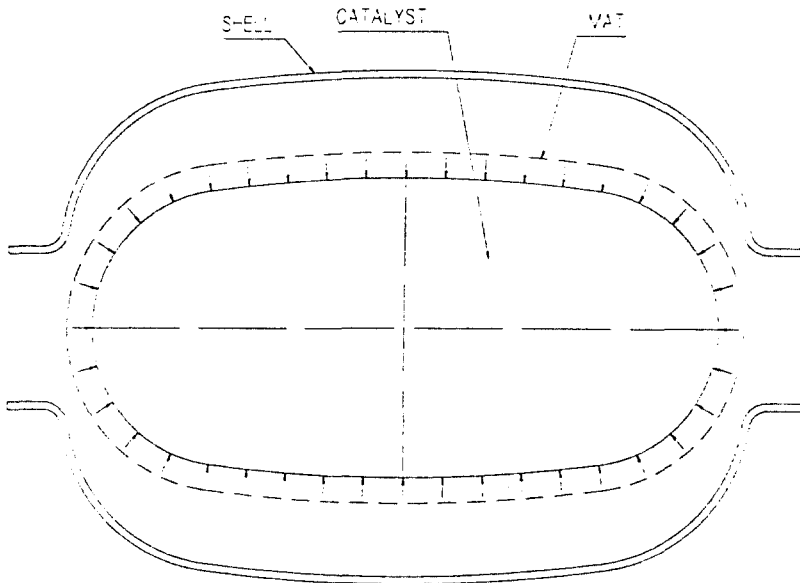


Fig. 9 Pressure distribution around the catalyst in the case of uniform loading (case 1).

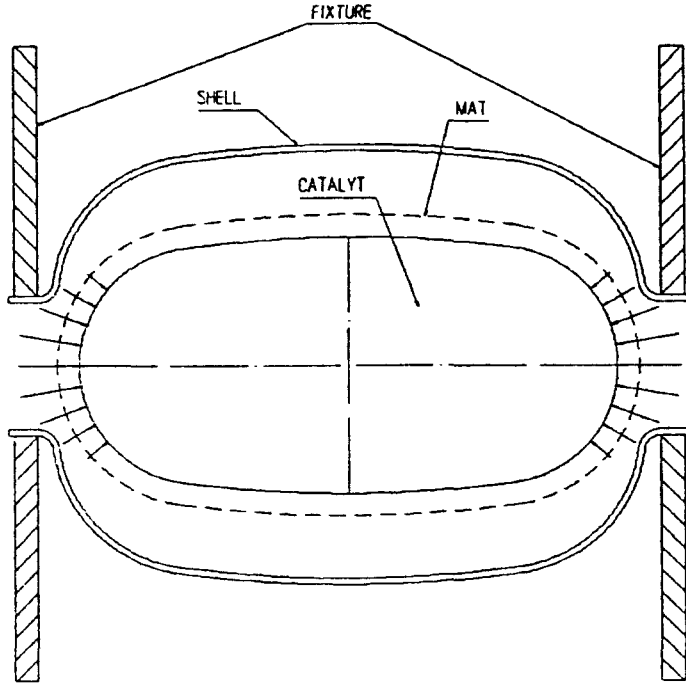


Fig. 10 Pressure distribution around the catalyst in the case of pressing the flange only(case 2).

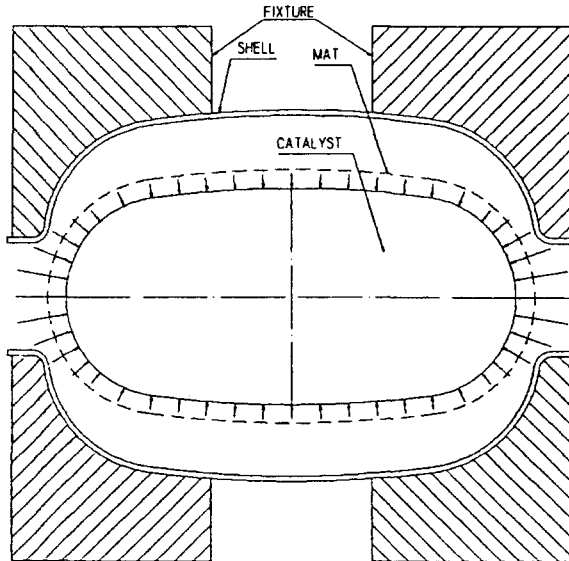


Fig. 11 Pressure distribution around the catalyst in the case of pressing both the flange and the shell (Case 3).

3. 결과 및 검토

canning 공정중 촉매 내부에 발생하는 응력에 의해 촉매가 파손될지의 여부를 판단하기 위해서는 mesh형상의 촉매에 대한 파손판별식이 있어야 한다. 그러나 현재로는 촉매에 대한 판별식이 없는 실정이고, 또한 본 연구에서 구한 응력분포는 가압력을 가정한 해석결과로 응력분포에 대한 정성적인 경향만을 나타낸다고 보아야한다. 따라서 본 연구에서는 표 2에서 보는 바와 같이 diagonal 방향의 압괴강도가 radial 방향의 1/10정도이므로 촉매의 파손은 전단에 의해 일어난다고 생각하여 전단응력 τ_{xy} 를 기준으로 파손이 일어날 가능성이 높은 영역을 조사하였다.

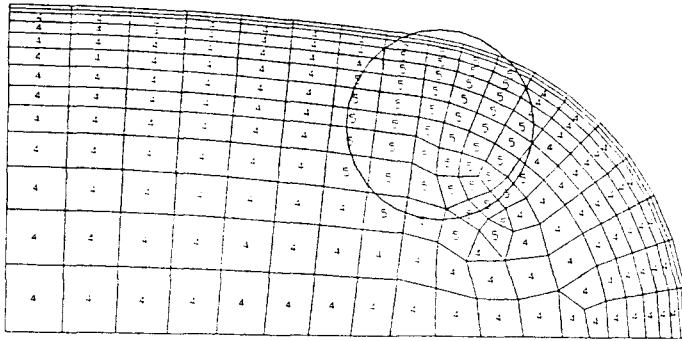
3.1 racetrack 형 촉매의 경우

촉매가 racetrack형상인 경우인 경우 3가지 loading조건하에서의 전단응력 분포를 그림 12에 나타내었다. 그림에서 각 요소에 표시한 수는 전단응력의 상대적인 크기를 나타낸다. 그림에서 보듯이 균일분포하중이 작용하는 경우(case 1)에는 전단응력이 비교적 균일하게 분포하고 그 크기도 case 2나 case 3에 비해서 매우 작은 값을 가진다. 또한 3가지 loading조건에서 모두 최대전단응력은 서로 다른 곡률을 가지는 원호가 교차하는 지점에서 발생하는데 case1의 경우는 교차점보다 약간 왼쪽이고, case 2와 3의 경우는 교차점 약간 오른쪽이라는 것을 알 수 있다.

3.2 wideoval 형 및 oval형 촉매의 경우

wideoval 형상과 oval형 촉매의 경우에 대한 해석 결과도 racetrack형 촉매와 비슷한 경향으로 최대전단응력은 서로 다른 곡률을 가지는 원호가 교차하는 지점에서 발생하고 case1의 경우는 교차점보다 약간 왼쪽, case 2와 3의 경우는 교차점 약간 오른쪽에서 발생한다는 것을 알 수 있었다. 또한 case 2와 3의 경우에 최대전단응력이 발생하는 지점이 racetrack형 촉매인 경우 보다 장축쪽으로 훨씬 치우침을 알 수 있었다.

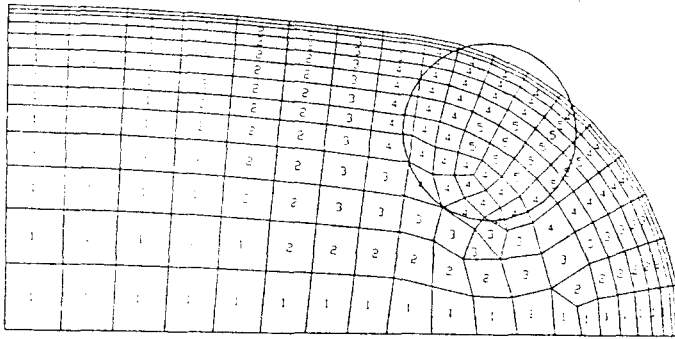
위의 검토로부터 본 연구에서 해석한 3가지 형상의 촉매의 경우 최대전단응력은 작은 곡률반경과 큰 곡률반경을 가지는 원호가 교차하는 지점에서 발생한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 canning공정 중에 촉매 내부에 발생하는 응력이 촉매의 압괴강도보다 커질 경우 이 부분에서부터 파손이 시작될 것이고 또한 그 파손양상은 촉매의 구조가 격자구조인 점을 감안하면 격자의 한줄 전체가 폭이 짧은 방향(장축에 수직한 y방향)으로 성냥곽이 찌그러지듯이 함몰하거나 그림 12에 원으로 표시한 부분이 함몰하는 양상을 보일 것이다. 이러한 파손양상은 그림 5에서 보인 파손양상과 일치하는 결과이다. 또한 균일 분포 하중이 작용하는 경우 측면에 비균일분포 하중이 작용하는 경우보다 전단응력의 값이 상대적으로 작고 파손의 확률도 낮을 것이라는 것을 알 수 있다. 따라서 shell 설계시 촉매를 가압하는 압력이 균일하도록 설계가 되어야하고 향후 이에 대한 연구가 필요하다고 생각한다.



Index for tau-xy

1	-7.5000E-02	-5.5400E-02
2	-5.5400E-02	-3.5800E-02
3	-3.5800E-02	-1.6200E-02
4	-1.6200E-02	3.4000E-03
5	3.4000E-03	2.3000E-02
6	2.3000E-02	4.2600E-02
7	4.2600E-02	6.2200E-02
8	6.2200E-02	8.1800E-02
9	8.1800E-02	1.0140E-01
10	1.0140E-01	1.2100E-01

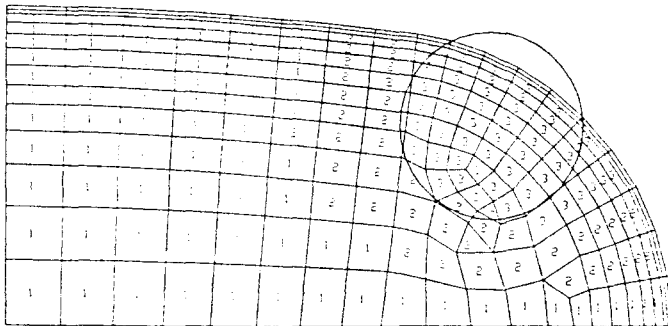
(a)



Index for tau-xy

1	5.0000E-04	1.9380E-02
2	1.9380E-02	3.8260E-02
3	3.8260E-02	5.7140E-02
4	5.7140E-02	7.6020E-02
5	7.6020E-02	9.4900E-02
6	9.4900E-02	1.1378E-01
7	1.1378E-01	1.3266E-01
8	1.3266E-01	1.5154E-01
9	1.5154E-01	1.7042E-01
10	1.7042E-01	1.8930E-01

(b)



Index for tau-xy

1	2.0000E-04	2.4480E-02
2	2.4480E-02	4.8760E-02
3	4.8760E-02	7.3040E-02
4	7.3040E-02	9.7320E-02
5	9.7320E-02	1.2160E-01
6	1.2160E-01	1.4588E-01
7	1.4588E-01	1.7016E-01
8	1.7016E-01	1.9444E-01
9	1.9444E-01	2.1872E-01
10	2.1872E-01	2.4300E-01

(c)

Fig. 12 Shear stress distribution in the racetrack-type catalyst for the (a) case 1, (b) case 2 and (c) case 3.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차 배기정화장치의 canning 공정중 촉매내부에 발생하는 응력분포를 구하기 위하여 3가지 유형의 촉매에 대한 유한요소 모형을 작성하였다. 이상적인 경우와 실제 작업하는 fixture에 대한 하중조건하에서의 촉매 내부에 발생하는 응력을 유한요소해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모든 하중조건하에서 3가지 촉매 모두 작은 곡률반경과 큰 곡률반경을 가지는 원호가 교차되는 지점에서 전단응력이 상대적으로 크고 이 부근에서 파손이 일어날 확률이 높다.
2. 균일 하중이 작용하는 경우 측면에 비균일하중이 작용하는 경우보다 전단응력값이 상대적으로 작다. 따라서 파손의 확률도 낮다.
3. 촉매의 장,단경부 반경의 차이가 작을수록(oval 형) 전단응력이 큰 영역은 단경부로 이동한다.
4. canning 공정에 이용되는 fixture를 설계할 때 촉매의 형상이 고려되어야할 것으로 판단되며, 아울러 가능한 한 촉매에 하중이 균일하게 작용될 수 있도록 형상이 결정되어야 한다.
5. canning 공정중 촉매 내부에 발생하는 응력분포를 보다 정확하게 예측하기 위해서는 shell과 mat 사이의 접촉과 mat의 점탄성 거동을 고려한 해석이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] D. K. S. Chen, E. J. Bisset, S. H. Oh and D. L. V. Ostrom, " A Three-Dimensional Model for the analysis of Transient Thermal and Conversion characteristics of Monolithic Converters", SAE paper No. 880282 1988.
- [2] S. T. Gulati and V. K. Pujari, "Mechanical Integrity of Ceramic Monolithic Converters", SAE paper No.811324, 1981.
- [3] S. T. Gulati, "New Developments in Packing of Ceramics Honeycomb Catalysts", SAE paper No.922252, 1992.
- [4] S. T. Gulati and D. K. S. Chen, "Isotatic Strength of Porous Cordierite Ceramic Monoliths", SAE paper No. 910375, 1991.
- [5] Y. C. Park, "A Study on the Improved Design for Automotive Catalytic Converter", SAE Paper No. 953774, 1995.

Table 1 Material Properties of Catalyst

Material		Property
mesh	$E_r = E_\theta$	$3.52 \times 10^2 \text{ kgf/mm}^2$
	E_z	$7.02 \times 10^2 \text{ kgf/mm}^2$
	$\nu_{r\theta}$	0.10
	$\nu_{\theta z} = \nu_{zr}$	0.25
	(ν_{rz})	(0.125)
cordierite	E	$1.43 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$
	ν	0.31

Table 2 Test data of Crush strength along axial, radial, and diagonal axes. [5]

Direction	Crush Strength	Isostatic Strength
Axial	2.2369 kg/mm^2	1.111 kg/mm^2
Radial	0.4853 kg/mm^2	
Diagonal	0.0490 kg/mm^2	

