

촉매변환기의 캐닝 공정능력 향상을 위한 GBD 예측 프로그램의 개발[§]

이 영 대** · 주 석 재*

* 울산대학교 기계공학부

Development of Program for Predicting GBD to Improve Canning Process Capability for Catalytic Converter

Young Dae Lee** and Seok Jae Chu*

* Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Ulsan,

(Received July 16, 2012 ; Revised December 5, 2012 ; Accepted December 7, 2012)

Key Words: Gap Bulk Density(간격체적밀도), Process Capability(공정능력), Catalytic Converter(촉매변환기), Substrate(담체), Mat(매트), Can(캔)

초록: 자동차 배기계의 앞쪽에 배치된 촉매변환기는 배기가스 중 유해한 성분을 무해한 것으로 변환하는 제품이다. 담체를 매트에 두르고 캔에 넣는 캐닝공정을 통하여 제작된다. 매트의 압력이 너무 높으면 담체가 파손되기 쉽고, 너무 작으면 담체가 미끄러지기 쉽다. 담체, 매트와 캔에 대한 통계학적인 오차분포를 반영하여 공정능력수준을 예측하고 담체의 파손이나 미끄러짐도 예측하는 프로그램을 EXCEL로 개발하였다. 상용 프로그램 결과와 비교하여 공정능력평가와 유한요소해석의 타당성을 입증하였다. 기존에 독립적으로 수행하던 유한요소 해석과 공정능력분석을 통합하였다.

Abstract: The catalytic converters for automobile exhaust systems are manufactured by inserting a mat-wrapped substrate into a stainless steel can. A residual pressure that is too high will initiate a fracture in the substrate. In contrast, a residual pressure that is too low will fail to hold the substrate in the acceleration or deceleration phase. Both the process capability and mat pressure on the substrate are predicted while considering the effect of the statistical variation in the dimensions of the parts. The validity of the solutions is then confirmed. A program using EXCEL combines a finite element analysis and process capability analysis in one program.

- 기호설명 -

C_{pk}	: 공정평균의 치우침을 고려한 공정능력 지수	t_m	: 매트의 두께
C_p	: 공정능력지수	a, b	: 장반경, 단반경
K	: 공정평균의 치우침	F_x, F_y, M_z	: 힘과 모멘트
USL	: 규격상한	g_t	: 목표틈새
LSL	: 규격하한	L	: 보 요소의 길이
σ	: 군내 표준편차	p_m	: 매트의 압력
μ	: 공정평균	X, Y, R	: 매트 외면의 좌표, 반경방향 거리
GBD	: 간격체적밀도 (g/m^3)	r_1, r_2	: 담체의 곡률반경
		u, v, θ	: 변위와 회전각
		ϵ	: 공칭 변형도
		η	: 반영비율

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 울산지회 춘계학술대회(2012. 5. 11., 울산대) 발표논문임

† Corresponding Author, mablej@naver.com

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

자동차 배기계 촉매변환기는 배기가스 중 유해

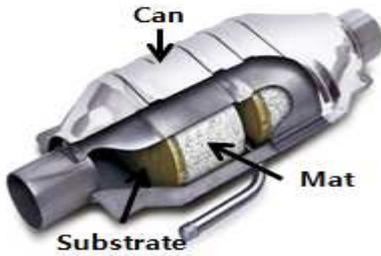


Fig. 1 Catalytic converter

한 성분을 무해한 것으로 변환하여 정화하여 주는 부품이다. 촉매 변환기는 Fig. 1과 같으며 담체(Substrate)를 매트(Mat)로 싸서 캔(Can)에 넣는 캐닝공정으로 만들어진다. 변환은 담체의 세라믹 표면에서 이루어지고 표면적을 늘리려고 미세한 격자형 단면으로 만든다. 점점 강화되고 있는 배기가스 규제에 대응하기 위하여 격자의 벽을 점점 얇게 하여 표면적을 늘리고 있어서 캐닝공정 중 담체가 깨질 가능성이 높아지고 있다. 한편 담체에 작용하는 압력이 너무 낮으면 자동차를 가속하거나 감속할 때 담체가 미끄러지므로 압력이 어느 한도 이상 유지되어야 한다.^(1,2)

담체에 작용하는 매트의 압력은 담체와 캔의 간격과 매트의 압축특성에 따라 결정된다. 즉, 담체와 캔의 형상과 치수, 매트의 종류에 따라 결정된다. 이것은 각각 공차범위 안에서 산포하므로 매트의 압력도 산포한다. 매트의 압력은 간격체적밀도인 GBD (Gap Bulk Density)로 나타낸다. 매트의 압력을 예상하기 위하여 유한요소 해석을 수행하고, 캐닝공정을 가상으로 수행하여 매트의 압력을 통계적으로 분석하는 촉매변환기 기초설계 프로그램을 개발하였다. 경우민⁽²⁾은 캐닝 공정이나 운전조건에 대하여 매트의 압력분포를 상용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 구하였다.

본 논문에서는 일반적으로 많이 사용하는 EXCEL을 이용하여 유한요소 해석과 통계학적으로 공정능력분석을 통합하여 수행 가능한 프로그램을 개발하였다. 유한요소해석 결과는 상용 프로그램인 ABAQUS와 비교하고⁽³⁾ 통계적 분석 결과는 통계학 프로그램인 Minitab과 비교하여 신뢰성을 검증하였다.

2. 유한요소 해석 및 공정능력분석

개발된 프로그램은 Fig. 3와 같이 구성되어있다. 운전 상태를 입력하고 담체, 매트, 캔의 종류

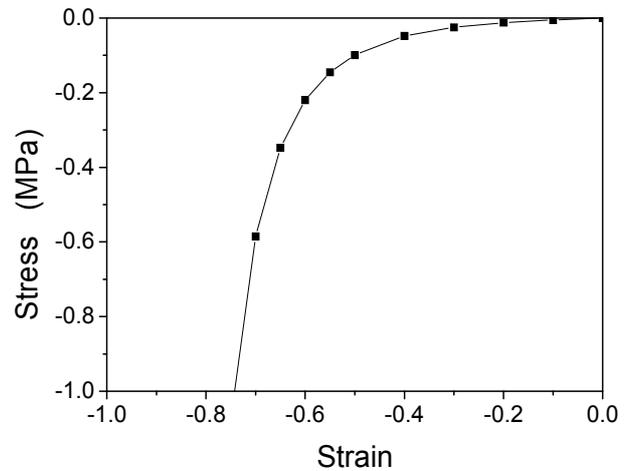


Fig. 2 Compression behavior of a mat

를 선택하면 유한요소해석을 진행하고, 공차와 공정능력지수를 입력하면 임의의 데이터를 생성하여 가상의 캐닝공정을 진행하여 공정능력을 분석하고, 이때 최악의 경우에 대하여 매트의 성능 예상결과들을 그래프로 나타내고 이를 바탕으로 기초설계의 적합성을 판단한다.

2.1 촉매변환기의 유한요소해석

촉매변환기의 단면은 원형이나 타원형이므로 대칭성을 이용하여 1/4만 모델링하여 해석하였다. 담체는 격자형 구조로 방향성이 있으나 보통 균질등방체로 취급한다. 매트는 Fig. 2와 같이 재료 비선형적이다. 담체는 매트에 비하여 거의 강체와 같으므로 강체로 가정하여 모델링하지 않았다. 매트도 모델링하지는 않고 담체와 캔의 틈새에 해당하는 압력만 계산하여 캔에 작용하였다. 매트는 재료 비선형적이므로 반복 계산이 필요하다. 반복 회수는 20회로 제한하였다. 매트의 두께 t_m 과 (담체의 외면과 캔의 내면 사이) 목표틈새 g_t 로 매트의 초기압력 p_m 을 ABAQUS의 HYPERFOAM에서 사용하는 식 (1)을 이용하여 식 (2)와 같이 계산 하였다.⁽⁴⁾ 변형체인 캔의 윤곽을 따라 절점 35개를 배치하였으나 강체인 담체에는 변위가 발생하지 않으므로 굳이 절점을 배치할 필요는 없으며 캔에 배치한 절점과 담체에 배치한 대응점의 거리 g_t 를 매트의 두께 t_m 와 비교하여 보면 매트의 압축정도, 즉 압축변형률 $\epsilon (= \frac{g_t}{t_m})$ 이 계산 된다. 압축변형률로 Fig. 2의 선도를 이용하여 응력을 계산한다.

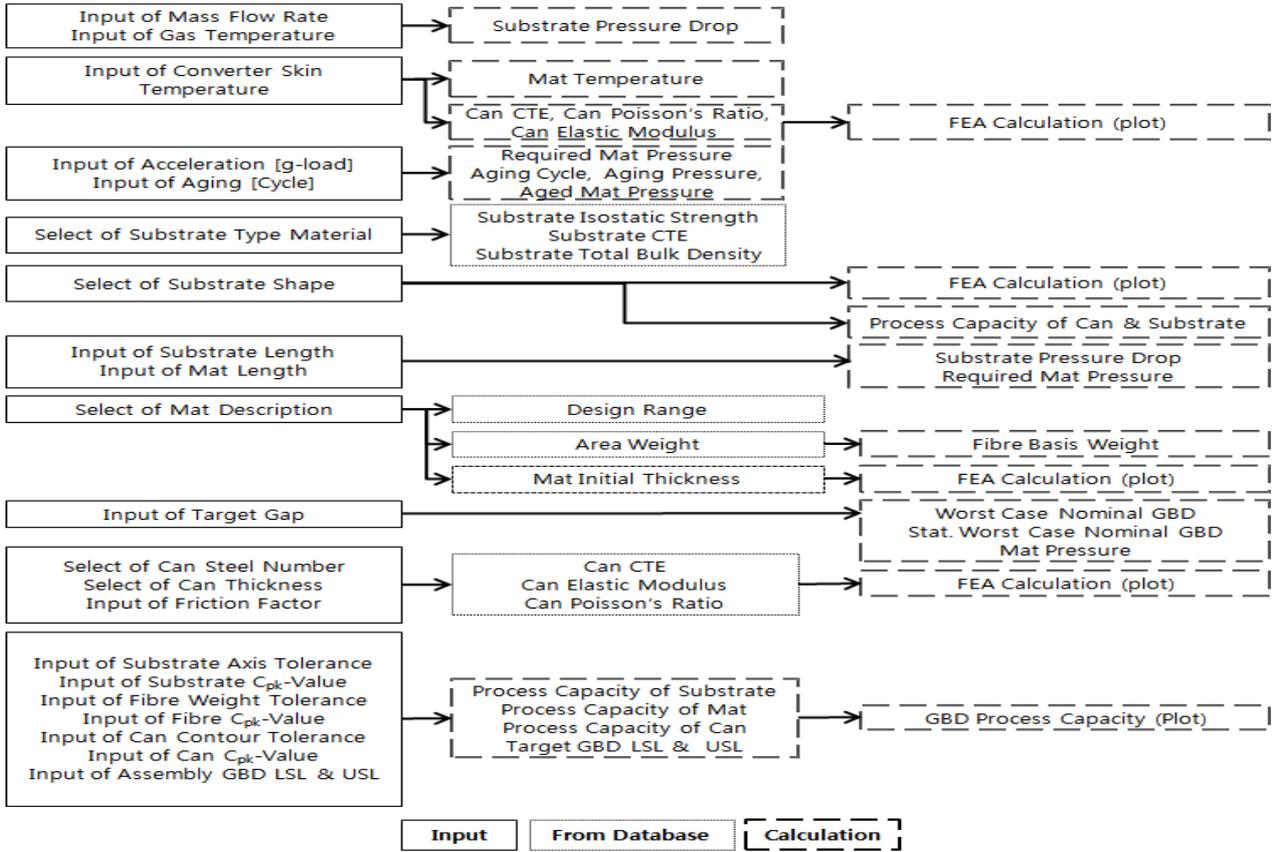


Fig. 3 Program input and output flow chart

$$p_m = \frac{2}{1 + \epsilon} \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} [(1 + \epsilon)^{\alpha_i} - 1] \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{g_t - t_m}{t_m} \text{ 이므로}$$

$$p_m = \frac{2t_m}{g_t} \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} \left[\left(\frac{g_t}{t_m} \right)^{\alpha_i} - 1 \right] \quad (2)$$

유한요소 해석에 관한 자세한 내용은 주식재 등의 논문에서 선행 연구되었다.⁽⁵⁾ 캔은 보 요소 35 개로 모델링하였다. 일반적으로 쉘요소(6자유도)를 사용하여야 하지만 본 논문에서 다른 대상은 축 방향으로 단면이 일정하다고 가정하여 평면문제에 취급하여 단면만 보요소(3자유도, u, v, θ)로 해석하였다. 보 요소는 평면 요소에 비하여 처짐을 구하는 데 유리하다.

유한요소 해석 과정은 다음과 같다.

- ① 장반경 a , 단반경 b , 곡률반경 r_1 으로 담체의 외면 윤곽을 계산.
- ② 매트 두께 t_m 과 (담체의 외면과 캔의 내면 사이) 목표틈새 g_t 로 매트의 초기압력 p_m 을 식

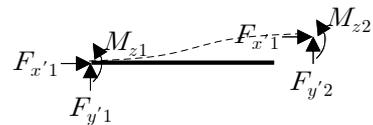
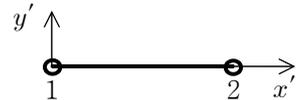


Fig. 4 Beam element

(1), (2)를 이용하여 계산.

- ③ 원호길이를 계산. 보 요소 35개를 원호길이 1, 2에 비례하여 배분하여 보 요소 길이 L 이 서로 비슷하게 함.

$$(cl)_1 = r_1\theta_1, (cl)_2 = r_2\theta_2 \quad (3)$$

- ④ 캔을 보 요소를 사용하여 모델링하고 매트의 압력을 작용. 캔의 변위를 구함.⁽³⁾

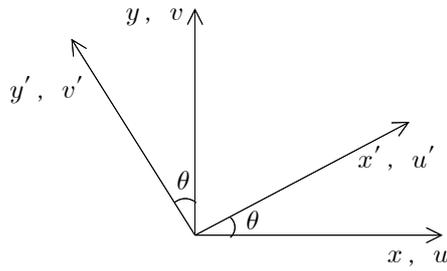


Fig. 5 Rotation of a coordinate system

보의 너비는 단위 길이로 가정하여 단면적은

$$A = t \tag{4}$$

굽힘 관성모멘트는

$$I_z = t^3/12 \tag{5}$$

x'은 보 길이 방향이다.

보는 굽힘 외에 균일인장이나 압축에 저항하는 것으로 취급하였다.

$$\begin{Bmatrix} F_{x'1} \\ F_{y'1} \\ M_{z1} \\ F_{x'2} \\ F_{y'2} \\ M_{z2} \end{Bmatrix} = \frac{EI_z}{L^3} \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 & -\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 6L & 0 & -12 & 6L \\ 0 & 6L & 4L^2 & 0 & -6L & 2L^2 \\ -\alpha & 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -6L & 0 & 12 & -6L \\ 0 & 6L & 2L^2 & 0 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u'_1 \\ v'_1 \\ \theta_{z1} \\ u'_2 \\ v'_2 \\ \theta_{z2} \end{Bmatrix}$$

여기서 $\alpha = \frac{AL^2}{I_z}$ (6)

전체좌표계로 바꾸면

$$\begin{Bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ M_{z1} \\ F_{x2} \\ F_{y2} \\ M_{z2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c & s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -s & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -s & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{x'1} \\ F_{y'1} \\ M_{z1} \\ F_{x'2} \\ F_{y'2} \\ M_{z2} \end{Bmatrix} \tag{7}$$

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_{z1} \\ u_2 \\ v_2 \\ \theta_{z2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c & s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -s & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -s & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u'_1 \\ v'_1 \\ \theta'_{z1} \\ u'_2 \\ v'_2 \\ \theta'_{z2} \end{Bmatrix} \tag{8}$$

대입하면

$$\begin{Bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ M_{z1} \\ F_{x2} \\ F_{y2} \\ M_{z2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c-s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c-s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{EI_z}{L^3} \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 & -\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 6L & 0 & -12 & 6L \\ 0 & 6L & 4L^2 & 0 & -6L & 2L^2 \\ -\alpha & 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -6L & 0 & 12 & -6L \\ 0 & 6L & 2L^2 & 0 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -c & s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -s & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -s & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_{z1} \\ u_2 \\ v_2 \\ \theta_{z2} \end{Bmatrix}$$

하중벡터 {f}는

$$\begin{Bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ M_{z1} \\ F_{x2} \\ F_{y2} \\ M_{z2} \end{Bmatrix} = p_m \frac{L}{2} \begin{Bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \\ 0 \\ -\sin\theta \\ \cos\theta \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{10}$$

Assemble 후

$$[K]\{u\} = \{f\} \tag{11}$$

EXCEL로는 역행렬을 곱하여 변위를 구한다.

$$\{u\} = [K]^{-1}\{f\} \tag{12}$$

⑤ 간격이 변하였으므로 다시 계산.

매트와 캔 내면 접촉면의 반경방향 거리 R_i를 계산.

원호 1에서는

$$R_i^* = \sqrt{(X_{i-1} - x_1 + u_i)^2 + (Y_{i-1} + v_i)^2} \tag{13}$$

원호 2에서는

$$R_i^* = \sqrt{(X_{i-1} + u_i)^2 + (Y_{i-1} - y_2 + v_i)^2} \tag{14}$$

이것을 100% 반영하지 않고 식 (15)와 같이 η << 1을 넣어 일부만 반영하는 방법을 사용.

$$R_{i+1} = (1 - \eta)R_{i-1} + \eta R_i^* \tag{15}$$

Table 1 Input data

	E	206 GPa
Can	ν	0.28
	t	1.5 mm
	μ_1, α_1	0.705e-3, 11.412
Mat	μ_2, α_2	1.186e-6, 25.000
	μ_3, α_3	1.511e-3, -2.183
	t_m	10.6 mm
	g_t	3.8 mm
	a	40.00 mm
Substrate	b	28.50 mm
	r_1	24.09 mm

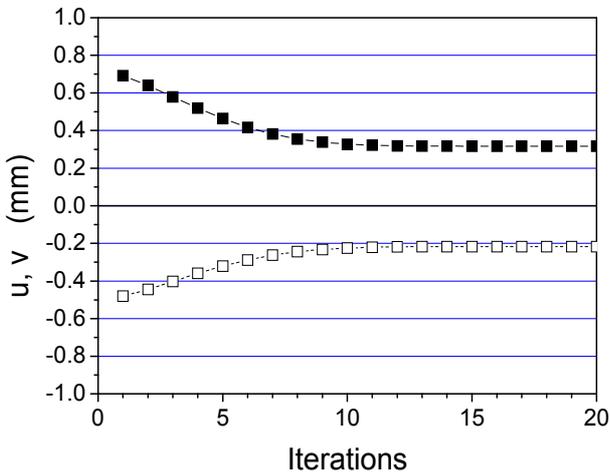


Fig. 6 Converged displacements

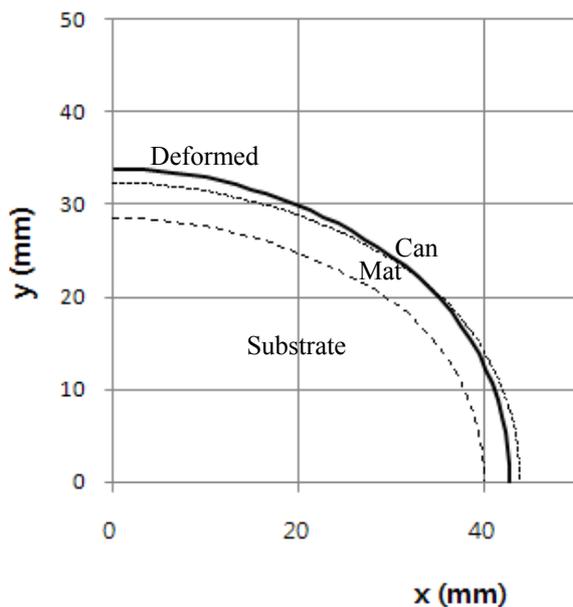
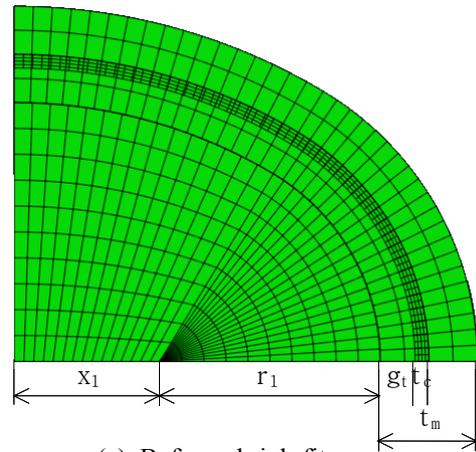
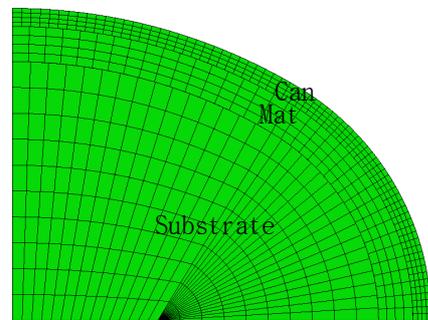


Fig. 7 Deformed shape(amplification factor 5)



(a) Before shrink-fit



(b) After shrink-fit

Fig. 8 Deformed shape

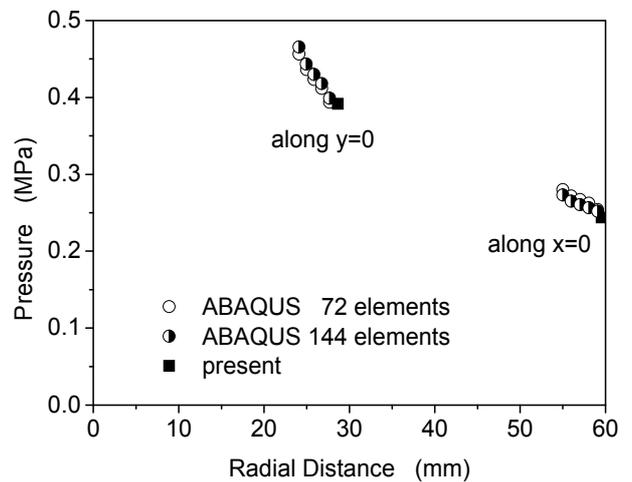


Fig. 9 Comparison of mat pressure

⑥ 수정된 매트 압력을 다시 작용하여 캔의 변위를 다시 구함.

⑤~⑥을 반복. 매트의 압력이 거의 달라지지 않을 때까지 계속.

Table 1과 같은 데이터를 입력하여 Fig. 6과 같이 수렴하고 Fig. 7과 같은 변형형상을 얻었다. η 는 0.06에서 0.48까지 반복횟수에 따라 점점 증가

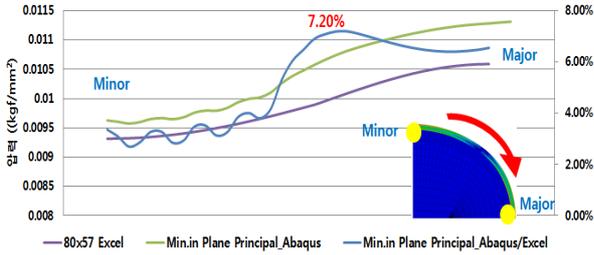


Fig. 10 Comparison of Mat Pressure (Abaqus & Excel)

시켜 수렴속도를 점점 증가시켰다.

개발된 프로그램의 신뢰성을 검토하기 위하여 ABAQUS를 이용하여 Fig. 8과 같이 담체, 매트, 캔을 모델링하여 해석결과를 비교하였다. 담체의 외면과 매트의 내면, 매트의 외면과 캔의 내면에 접촉조건을 부여하고 후자는 수축맞춤 *CONTACT INTERFERENCE, SHRINK를 설정하였다.⁽⁴⁾ Fig. 8 캔은 원주방향으로 72 개 요소를 배치하였다. 2 배 늘려 144 개 요소를 배치하니 Fig. 9와 같이 본 논문의 보요소 결과를 향하여 접근하였다. 또한 ABAQUS와 개발된 프로그램에서의 단경반향에서 장경방향으로 시계방향으로 매트의 압력을 비교하면 Fig. 10과 같이 최대 7.2%의 오차를 가지고 있으며 이로써 개발된 유한요소 프로그램의 타당성을 입증하였다.

2.2 통계학적 공정능력분석

담체의 반지름, 매트의 무게, 캔의 반지름에 대하여 6σ 수준을 만족하는 임의의 데이터를 100,000개 생성하고 가상으로 캐닝공정을 진행하여 공정능력을 분석하였다. 공정능력지수 Cp는 표준편차가 σ일 때

$$C_p = \frac{(USL - LSL)}{6\sigma} \quad (16)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (17)$$

단품의 상한과 하한이 있고 치우침이 있는 경우 공정평균의 치우침을 고려한 공정능력지수 Cpk는^(6,7)

$$C_{pk} = (1 - K)C_p \quad (18)$$

$$K = \frac{|(USL + LSL)/2 - \mu|}{(USL - LSL)/2} \quad (19)$$

Table 2 Input data

Component	Mean	Tolerance Spec.		C _{pk}
		Low (-)	High (+)	
Substrate Radius (mm)	33.96	0.10	0.10	1.67
Fiber Weight Tolerance (g/m ²)	1400	139.97	139.97	1.67
Can Contour Radius (mm)	37.76	0.10	0.10	1.67

Table 3 Generated data

No.	Substrate Random Data (mm)	Can Random Data (mm)	Mat Random Data (g/m ²)
1	33.958	37.753	1391.273
2	33.952	37.791	1381.617
3	33.954	37.740	1366.358
...
100,000	33.984	37.781	1371.812

Table 4 Mean and standard deviation of generated data

		Mean	Standard Deviation	Difference in Standard Deviation
Substrate	EXCEL	33.96	0.07694	0.20%
	Minitab	33.96	0.07679	
Can	EXCEL	37.76	0.01539	0.00%
	Minitab	37.76	0.01539	
Mat	EXCEL	1400	21.53	0.06%
	Minitab	1400	21.54	

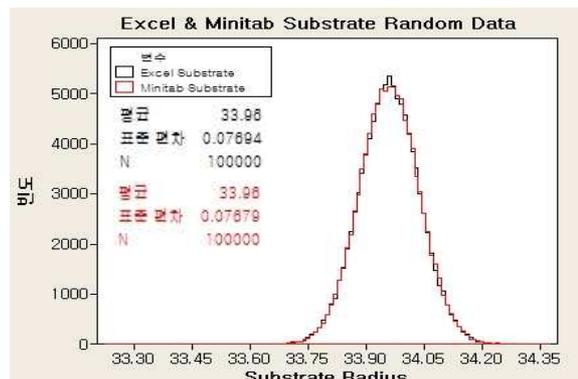
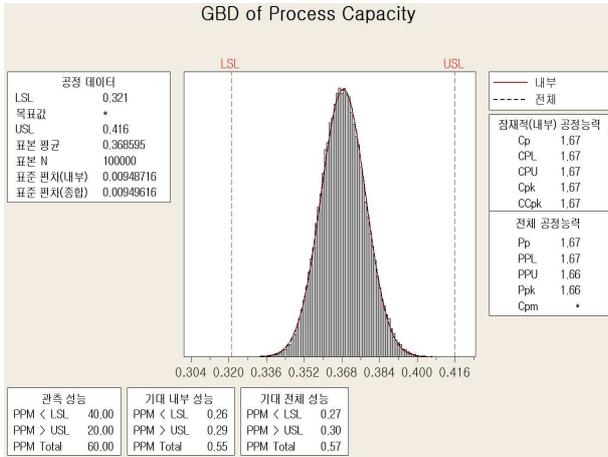
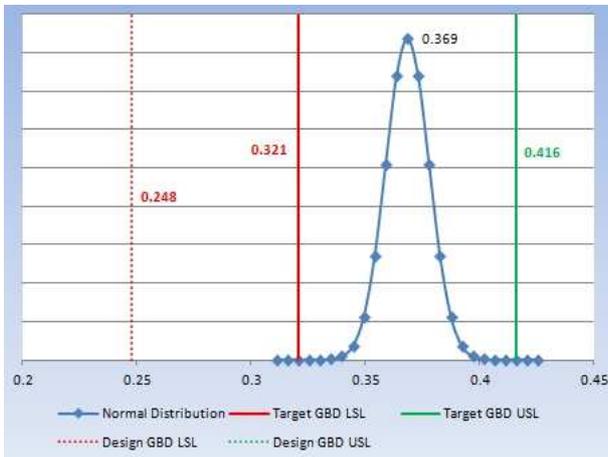


Fig. 11 Distribution of generated data



(a) Minitab



(b) EXCEL

Fig. 12 GBD process capability output

평균, 공차의 상한과 하한, 목표공정능력을 Table 2와 같이 입력하고 정규분포를 가정하여 임의의 데이터 100,000개를 Table 3과 같이 생성하였다. Minitab의 메뉴 계산 > 랜덤데이터 > 정규분포를 선택하고 평균과 표준편차를 입력하여 임의의 데이터를 생성하였다.

EXCEL의 메뉴 데이터 > 데이터분석 > 난수 생성 > 정규분포를 선택하고 평균과 표준편차를 입력하여 임의의 데이터를 생성하였다.

Visual Basic Macro를 이용하여 임의의 데이터 생성과 공정능력 분석을 한 번에 계산되게 만들었다. 표준편차는 Table 3과 식 (17)로 구하였다.

Minitab을 이용하여 본 프로그램의 신뢰성을 검증하였다. 본 프로그램에 입력한 것과 같은 입력 변수를 Minitab에 입력하여 생성된 담체 데이터를 비교하면 Fig. 11과 같다. Table 4와 같이 평균은

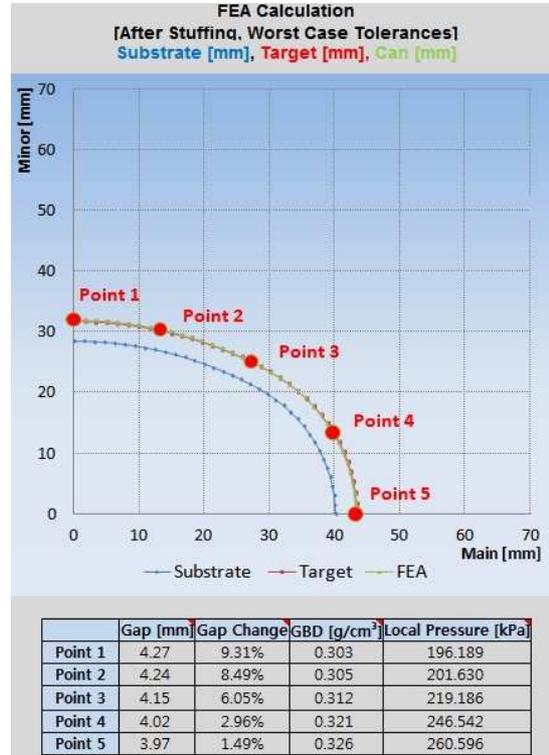


Fig. 13 Display of finite element solutions

같고 표준편차는 1% 이내로 같았다. 생성된 데이터에 대하여 가상적으로 캐닝공정을 수행하여 GBD를 계산하고 공정능력을 분석하였다. 공정이 안정되어 있다는 가정 하에 공정 산포와 치우침을 모두 고려하면^(6,7)

$$C_{pk} = \min(C_{pl}, C_{pu}) \quad (20)$$

$$C_{pl} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \quad (21)$$

$$C_{pu} = \frac{USL - \mu}{3\sigma} \quad (22)$$

C_{pk} 가 1.67인(6σ 수준)을 만족하는 tolerance = $|\mu - LSL| = |USL - \mu|$ 를 구하였다. 그리고 GBD의 상한과 하한을 구하였다. Fig. 12(a)는 Minitab을, (b)는 EXCEL을 이용하여 공정능력을 분석한 결과로 LSL과 USL이 서로 같다. 따라서 EXCEL을 이용하여 공정능력을 분석한 결과의 신뢰성을 검증하였다.

3. 설계 적합성 판단 및 프로그램 구성

매트의 재료 비선형 유한요소해석과 더불어서

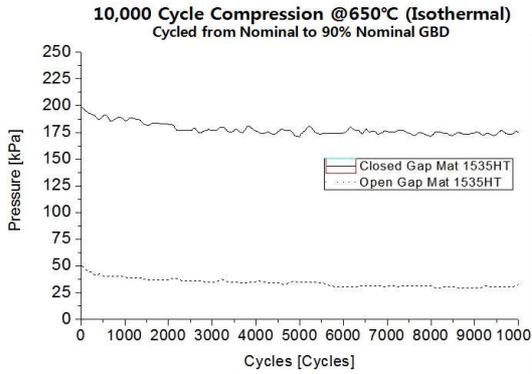


Fig. 14 Performance degradation of mat

공정능력분석에 이어서 매트 of 내구열화도 반영하는 프로그램도 추가하였다.

3.1 설계 적합성 판단

비선형 유한요소해석을 수행하여 캐닝공정 중 담체에 작용하는 압력의 적합성을 검토한다.

공정능력의 분석 결과는 Fig. 12(b)와 같이 출력된다. 생성된 GBD는 LSL과 USL 사이에 존재하여야 한다. 허용범위를 넘은 경우는 각 단품의 공차(Tolerance Spec)를 줄여 공정능력을 높여야 한다.

유한요소 해석 결과는 Fig. 13과 같이 출력된다. ¼ 모델링에서 총 35개 요소로 나누어 유한요소 해석을 진행하였고 각 요소의 위치 및 형상을 출력하며 그 중 대표적인 5개의 위치에서 간격, 간격변화, GBD, 국부적 압력을 출력한다. 해석의 결과는 공정능력 분석결과 of LSL GBD에 대한 담체의 국부적 압력이 담체의 최소지지 압력보다는 높아야 하고, USL GBD에 대한 의 국부적 압력이 담체의 파손압력보다 높지 않아야 한다. 유한요소해석의 결과가 부적합할 경우에는 담체의 형상, 매트 of 종류, 캔 of 크기를 변경하여 담체가 깨지지도 미끄러지지도 않게 한다.

엔진을 시동하면 촉매변환기 of 온도가 높아졌다가, 엔진을 끄면 온도가 낮아지는 것을 반복한다. 이 때 캔과 담체 of 열팽창계수가 달라서 매트 of 압력도 변한다. 이것이 주기적으로 반복되면 매트는 Fig. 14와 같이 매트 of 압력이 감소한다. 이러한 압력 of 감소는 매트마다 다르기 때문에 매트를 잘 선택하여 특정 횟수까지 담체 of 최소지지압력보다 낮아지지 않게 하여야 한다. Fig. 14는 매트 of 종류에 따라서 데이터베이스와 하

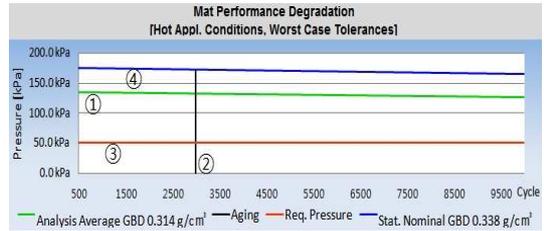


Fig. 15 Acceptable mat performance

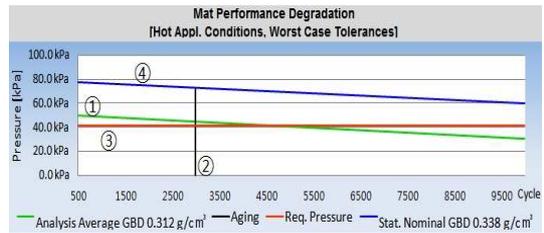


Fig. 16 Unacceptable mat performance

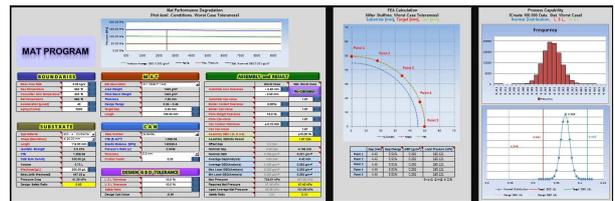


Fig. 17 Program layout

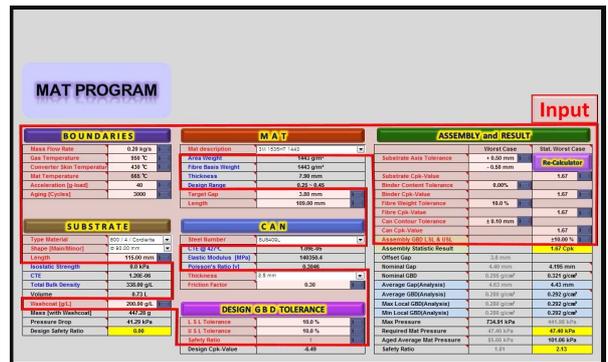


Fig. 18 Input(database) and output

였기 때문에 매트를 선택하면 자동으로 반영되도록 되어있다. 이 반영된 결과를 Fig. 15~16과 같이 출력하여 설계자에게 제공한다.

Fig. 15는 설계가 적합하게 이루어진 경우이고 Fig. 16은 적합하게 이루어지 않은 경우이다. Fig. 15~16에서 ①Analysis Average GBD는 통계적으로 구한 담체와 캔 of 간격과 최악 of 매트 to 캐닝공정을 진행하였을 때 GBD에 대한 압력강하를 나

타낸다. ②Aging은 매트(Aging Cycle)을 나타낸다. ③Required Pressure는 담체가 미끄러지지 않는 최소한의 요구압력이다. ④Statistical Nominal GBD는 공정능력 분석 결과 최소 LSL GBD에 대한 압력강하를 나타낸다. Fig. 15와 같이 특정 횟수가 지나도 Analysis Average GBD, Statistical Nominal GBD 모두 Required Pressure보다 높으면 담체가 미끄러지지 않지만, Fig. 16과 같이 특정 횟수 이후에 Required Pressure보다 압력이 낮아지게 되면 담체가 미끄러지므로 설계를 다시 하여야 한다.

3.2 프로그램 구성

본 프로그램은 VBA를 이용하여 작성되었고 간단히 설계변수를 입력하거나 선택하면 유한요소 해석, 공정능력분석, 매트열화반영을 모두 수행한다.

본 프로그램의 전체적인 구성은 Fig. 17과 같이 구성되어 있다. Fig. 18은 설계변수 입력창이다. 축매변환기의 경계조건, 담체의 종류, 담체의 형상, 매트(Aging Cycle)의 종류, 캔의 종류, 공차, 공정능력지수를 입력하면 Fig. 12, 13, 15의 설계의 적합성을 판단할 수 있는 결과창이 출력된다.

4. 결론

본 논문에서는 6σ 수준의 공정능력을 만족하는 제품의 설계를 목표로 3가지 부품의 오차분포를 전제하여 공정능력수준을 예측하고 담체의 파손이나 미끄러짐도 예측하는 프로그램을 EXCEL로 개발하였다.

담체의 반지름, 매트(Aging Cycle)의 무게, 캔의 반지름에 대하여 치우침이 없는 좌우 대칭형 정규분포로 가정하고 100,000개씩 임의의 데이터를 생성하고 Minitab 결과와 비교하여 공정능력평가의 타당성을 입증하였다.

축매변환기의 일반적인 타원 단면에 대한 유한요소해석 결과를 ABAQUS 결과와 비교하여 Mat의 압력은 10%, Can의 변위는 5% 이내의 오차범

위 내에 있으며 개발된 프로그램의 타당성을 입증하였으며 유한요소과정만 비교하였을 때 개발된 프로그램은 약 30초 내로 해석이 가능하다. Minitab과 공정능력 분석결과를 비교한 결과 오차는 약 1% 이내로 개발된 프로그램의 타당성이 입증되었다. 또한 유한요소해석과 공정능력분석을 통합하였기 때문에 기초 설계 시 간편하게 축매 변환기의 설계의 적합성을 평가할 수 있다. 그리고 Database를 구축하여 사용이 용이하다.

후 기

본 연구는 2009년 ~ 2011년 지역산업선도기술개발사업(세종공업 위탁연구)으로 수행된 것으로 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

- (1) Park, Y. C., 1995, "A Study on the Improved Design for Automotive Catalytic Converter," *KSAE*, Vol. 3, No. 5, pp. 135~142.
- (2) Kyoung, W. M., 2002, "Intumescent Mat Modeling for the Pressure Distribution Prediction of the Catalytic Converter System," *KSME Materials and Fracture Proceeding*, pp.295~392
- (3) Chu, S. J., *Finite Element Analysis Using Microsoft Excel*, UOU Press, 2005.
- (4) ABAQUS 6.10 Keywords Reference Manual.
- (5) Chu, S. J. and Lee, Y. D., 2011, "Development of a Finite Element Program for Determining Mat Pressure in the Canning Process for a Catalytic Converter," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 11, pp. 1471~1476.
- (6) Kane, V. E., 1986, "Process Capability Indices," *Journal of Quality Technology*, Vol. 18, No. 1, pp. 41~52.
- (7) Greenwich, M. and Jahr-Schaffrath, B. L., 1995, "A Process Incapability Index," *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 12, No. 4, pp. 58~71.