

벌크화물용 포장용기의 최적 설계(I)-알고리즘 개발

박종민, 권순구
밀양대학교 기계공학과

Optimum Design of Packaging Container for Bulk Materials(I)-Algorithm Development

Jong-Min Park, Soon-Goo Kwon

Dept. of Mechanical Engineering, Miryang National University

Abstract

In optimum design of packaging container for bulk materials, minimum board area, compression performance and distribution efficiency must be considered. In this study, mathematical models for minimum board area (RMA), compression strength (CS) and maximum compression strength per unit board area (MCSA) of container as algorithm for optimum design of packaging container for bulk materials were developed as follows : $RMA=f(V,D)$, $a_{RMA}=f(V,D)$, $MCSA=f(V,D)$, and $a_{MCSA}=f(V,D)$. In order to develop these models, compression test according to various dimensions of container and response surface analysis for minimum board area, compression strength, and maximum compression strength per unit board area of container were carried out. In developed models, volume and depth of container were principal independent variables. Through the verified results for these models, optimum design of packaging container on the design conditions and limit conditions was possible. These models might be used in developing optimum design software of packaging container for bulk materials.

Key words : bulk materials, packaging container, optimum design, compression strength, minimum board area

서론

물적유통은 포장, 수송, 하역, 보관, 통신(정보)의 5가지 요소로 분리되는데, 이들 요소들이 서로 시스템화됨으로써 물적유통은 성립된다. 물적유통중 포장이 차지하는 비중은 물류비 전체 금액기준으로 볼 때 그리 크지 않으나, 물적유통의 다른 요소들 즉, 수송, 보관, 하역 등에 직접적인 영향을 미치므로 포장을 물류의 원천이라 일컫는다. 따라서 제품의 포장설계시에는 물적유통의 제요소를 감안하여야 한다.⁽¹⁾

일정한 크기와 형태를 하고 있지않은 벌크화물(bulk materials)용 포장상자의 경우, 같은 양의 물품을 포장하는데 상자의 외형치수(길이, 폭 및 높이) 비율에 따라 상자의 소요면적(required board area)이 달라질 뿐만 아니라, 압축강도 면에서도 큰 차이를 나타낸다.(2~4) 즉, 벌크화물용 포장상자의 최적설계 문제는 상자 제작상의 최소소요면적, 상자의 강도적 특성 및 물류효율 측면(팰리트 및 차량적재효율) 등 여러 요인들이 복합되어 있다. 따라서 이들 요인들을 모두 최대로 만족시키는 단일 최적설계조건은 잇을 수 없으며, 어디까지나 이들 요인들에 대한 가중치를 적용하거나 또는 절충한 최적조건만이 존재하게 된다.

상자의 performance와 강도적 특성이 최대한도로 고

Corresponding author : Jong-Min Park, Dept. of Mechanical Engineering, Miryang National University, 1025-1 Neidong, Miryang-si, Kyungnam, 627-702, Korea

려된 최적화 설계가 이루어질 경우, 상자의 제작에 소요되는 원단의 소요량을 절감할 수 있고, 어느 정도의 강도 향상 뿐만 아니라, 목적인 바에 따라서는 펄리트 및 차량의 적재효율 향상을 가져와 물류측면에서의 효율 향상을 기대할 수 있다.

포장상자를 하나의 공학적 구조물(engineering structure)로써 보고, 이 구조물의 구조역학적 인자의 분석을 통한 여러 설계에 관한 정보를 얻으려는 연구가 선진외국에서는 일찍부터 진행되어져 왔다.^(3,5-15) 이들 연구들의 대부분은 주로 실험적 방법에 의존하여 원지, 원단 및 상자 상호간의 역학적 상관관계로부터 상자의 압축강도 추정방법에 관한 것들이다.^(3,13,15)

최근에는 컴퓨터 활용기술의 발달로 유한요소해석법(finite element analysis)의 적용으로 응력 및 변위해석을 통한 포장상자의 최적설계와 품질향상에 대한 연구가 국내·외의 일부에서 진행되고 있으며^(6,16), 앞으로 포장 전 분야에서 유한요소해석법의 활용이 확대될 것으로 기대된다.

상자의 외형치수 비율과 상자 압축강도와의 관계에 대한 연구결과를 살펴보면, 상자의 폭/길이 비가 일정할 경우, 상자의 압축강도는 상자의 높이에 따라 어느 수준까지는 감소하다 일정한 값으로 유지되고, 또한 상자의 주변장과 높이가 일정할 때, 폭/길이 비가 약 0.6 부근에서 최대가 되며, 주변장의 길이가 증가할 수록 커지는데 대략 주변장의 1/3승에 비례한다고 보고하고 있

다.^(17,18) 그러나 이들 대부분이 특정한 상자 치수를 대상으로한 연구 결과들이어서 이로부터 벌크화물용 상자설계 문제에서 가장 중요한 인자인 소요체적을 형성하는 최소소요면적과 강도적 특성에 대한 최적조건을 유추할 수가 없는 형편이다.

따라서 이 연구에서는 벌크화물용 포장상자의 최적설계를 위한 제반 알고리즘으로써, 포장상자의 외형치수(길이, 폭 및 높이) 비율 변화에 따른 최소소요면적과 강도적 특성에 대한 최적화 모형을 개발하려고 한다.

수학적 모형화와 반응표면 분석

최소소요면적에 대한 모형

RSC(regular slotted container)형 포장상자의 길이, 폭 및 높이를 각각 $L=x$, $W=ax$ ($a=W/L$), $D=y$ 라 놓으면, 형성되는 상자의 체적(V)과 소요면적(RBA)은 다음과 같이 각각 표현된다.

$$V = LWD=ax^2y \tag{1}$$

$$RBA = 2xy + 2axy + \frac{4ax^2}{2} + \frac{4a^2x^2}{2} = 2x(1+a)(y+ax) \tag{2}$$

Table 1. The results of the response surface analysis for minimum board area of container

Depth	Volume, cm														
	20000	30000	40000	50000	60000	70000	80000	90000	100000	110000	120000	130000	140000	150000	
20	3379.57 (0.4109)	5586.41 (0.3487)	7574.74 (0.3151)	9445.06 (0.2925)	11237.6 (0.2758)	12973.7 (0.2627)	14666.0 (0.2519)	16323.1 (0.2429)	17951.0 (0.2351)	19554.0 (0.2284)	21135.7 (0.2224)	22698.6 (0.2170)	24244.9 (0.2122)	25776.3 (0.2077)	27294.3 (0.2037)
30	3322.21 (0.5302)	5281.54 (0.4611)	6997.31 (0.4220)	8582.91 (0.3952)	10083.3 (0.3750)	11522.1 (0.3589)	12913.4 (0.3456)	14266.5 (0.3344)	15588.1 (0.3246)	16883.0 (0.3161)	18154.9 (0.3085)	19406.6 (0.3016)	20640.5 (0.2954)	21858.5 (0.2897)	23062.1 (0.2845)
40	3412.42 (0.6169)	5288.72 (0.5473)	6987.42 (0.5065)	8364.17 (0.4778)	9738.51 (0.4559)	11046.2 (0.482)	12302.7 (0.4235)	13518.3 (0.4109)	14700.0 (0.4000)	15853.1 (0.3903)	16981.6 (0.3817)	18088.7 (0.3739)	19176.7 (0.3668)	20247.8 (0.3603)	21303.7 (0.3543)
50	3553.17 (0.6816)	5410.75 (0.6146)	6977.71 (0.5740)	8391.37 (0.5449)	9705.61 (0.5224)	10948.4 (0.5041)	12136.4 (0.4887)	13280.6 (0.4754)	14388.8 (0.4639)	15466.5 (0.4536)	16518.1 (0.4443)	17546.9 (0.4360)	18555.5 (0.4283)	19546.2 (0.4213)	20520.8 (0.4148)
60	3713.49 (0.7310)	5583.24 (0.6678)	7140.40 (0.6286)	8533.33 (0.6000)	9820.08 (0.5776)	11036.6 (0.5592)	12183.0 (0.5436)	13288.8 (0.5302)	14356.4 (0.5183)	15391.8 (0.5077)	16399.5 (0.4982)	17383.1 (0.4895)	18345.4 (0.4815)	19288.8 (0.4742)	20215.2 (0.4674)
70	3880.97 (0.7695)	5779.57 (0.7107)	7344.55 (0.6733)	8734.80 (0.6457)	10012.3 (0.6238)	11209.1 (0.6057)	12344.3 (0.5903)	13430.4 (0.5768)	14476.1 (0.5650)	15847.8 (0.5543)	16470.3 (0.5447)	17427.5 (0.5359)	18362.4 (0.5279)	19277.3 (0.5204)	20174.3 (0.5134)

(Note) ()최소소요면적을 위한 폭/길이 비

동일한 상자의 체적을 형성하면서 최소소요면적을 위한 조건은 식(2)의 RBA를 x와 y에 대하여 각각 편미분 하므로써 다음과 같이 구할 수 있다. 즉,

$$\frac{\partial(RBA)}{\partial x} = 2(1+a) \left\{ (y+ax)+x\left(\frac{dy}{dx}+a\right) \right\},$$

$$\frac{\partial(RBA)}{\partial x} = 0 \quad \therefore x = \sqrt[3]{\frac{V}{2a^2}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(RBA)}{\partial y} = 2(1+a) \left\{ \frac{dx}{dy}(y+ax)+x\left(1+a\frac{dx}{dy}\right) \right\}$$

$$\frac{\partial(RBA)}{\partial y} = 0 \quad \therefore y = 2ax \quad (4)$$

위의 식(1)~식(4)를 토대로 상자의 최소소요면적에 대한 수학적 모형을 개발하기 위해 Mathematica v2.2(Wolfram Research Inc.)⁽¹⁹⁾를 이용하여 반응표면 분석(response surface analysis)을 실시하였으며, 그 결과를 부록의 Fig. A1~Fig. A15에 나타내었다.

반응표면분석 결과를 요약한 Table 1의 자료를 활용하여, 임의의 체적(포장중량/밀도)에 대한 상자의 소요면적을 최소화하는 외형치수를 결정하기 위해서는 이들 변수에 대한 수학적 모형화가 필요하다. 따라서 통계 패키지인 DataFit v6.0(OAKDALE Engineering)을 이용하여 수학적 모델링을 실시하였으며, 그 결과를 식(5)와 식(6)에 각각 나타내었다(Fig. 1, Fig. 2).

일반적으로 수학적 모형은 가능한 간단하면서 정확한 예측을 할 수 있어야 한다. 그러나 본 연구에서와 같이 컴퓨터 프로그램의 알고리즘으로써 수학적 모형을 선택할 때는 다소 식이 복잡하더라도 정확한 값의 예측에 더욱 큰 비중을 두어야 한다.

$$RMA = 27477.6732+0.7533V-21921.9875\{\log(D)\}-4.4700 \times 10^{-7} V^2+5900.1251$$

$$\{\log(D)\}^2-0.2750V \{\log(D)\}+1.8828 \times 10^{-12} V^3-503.4147\{\log(D)\}^3+0.0333V$$

$$\{\log(D)\}^2-6.5360 \times 10^{-8} V^2 \{\log(D)\},$$

$$r^2=0.9999 \quad (5)$$

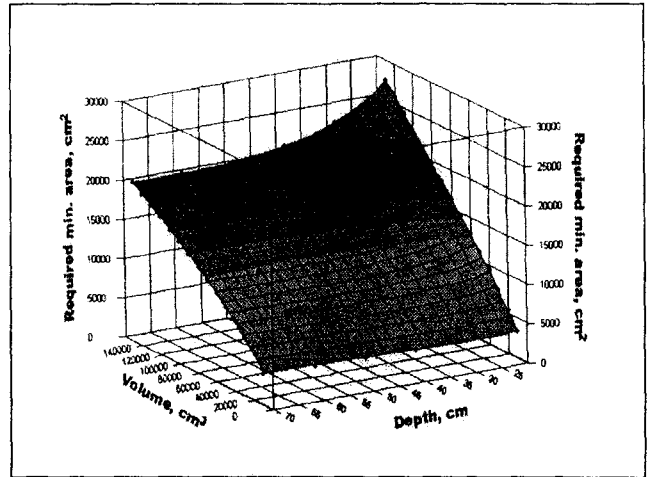


Fig. 1. Minimum board area according to volume and depth of container

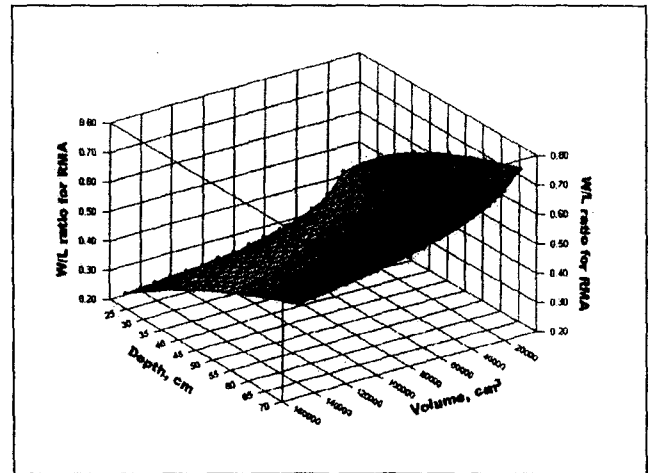


Fig. 2. Width/Length ratio for minimum board area of container

$$a_{RMA} = 0.2156-0.0749\{\log(V)\}+0.4011\{\log(D)\}$$

$$+0.0014\{\log(V)\}^2-0.0044\{\log(D)\}^2-$$

$$0.0186\{\log(V)\}\{\log(D)\}+0.0010\{\log(V)\}^3$$

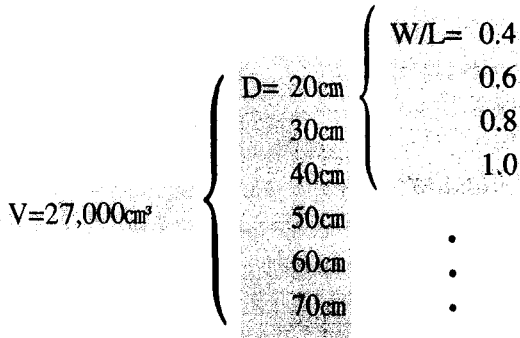
$$-0.0223\{\log(D)\}^3+0.0256$$

$$\log(V)\{\log(D)\}^2-0.0086\{\log(V)\}^2$$

$$\{\log(D)\}, r^2=0.9999 \quad (6)$$

압축강도에 대한 모형

동일한 상자의 체적을 형성하면서 압축강도를 최대화하는 상자의 외형조건을 분석하여, 이를 모델링하기 위하여 다음과 같은 치수를 갖는 상자 24종(1×6×4)을 제작하여 상자압축실험을 실시하였다.



절차와 방법은 ASTM D642⁽²⁰⁾와 KS A1012⁽²¹⁾를 참고 하였으며, 하중재하속도는 $12.7\pm 2.5\text{mm/min}$ 로 하였다. 또한 실험전 상자를 온도 $23\pm 1^\circ\text{C}$, 상대습도 50%로 잘 조성된 대형 항온항습기내에서 48시간 이상 충분히 평형시켰으며,^(22,23) 상자의 각 치수에서 5반복 실험하여 그 평균값을 취하였다.

상자의 압축강도를 상자의 높이와 폭/길이 비를 인자로 하는 수학적 모형화 한 결과를 식(7)에 나타내었다 (Fig. 3).

분석에 적용된 포장상자는 RSC형 DW로 원지배합은 KA180/S120/K200/S120/K200이며, 상자의 압축실험

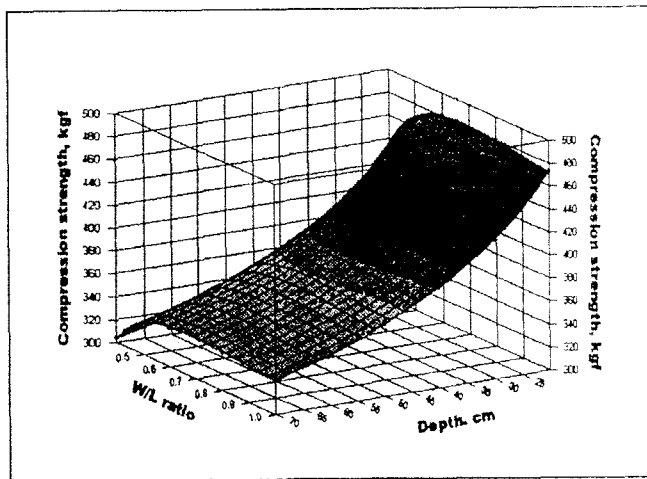


Fig. 3. Compression strength according to W/L ratio and depth of container [$V=27,000\text{cm}^3$, • measured values]

$$\begin{aligned}
 CS = & 832.9781 - 160.6160\{\log(D)\} + \frac{202.3906}{a} \\
 & + 3.8699\{\log(D)\}^2 - \frac{47.9764}{a^2} \\
 & - 46.4299\frac{\log(D)}{a} + 1.0015\{\log(D)\}^3 - \frac{6.2277}{a^3} \\
 & + 11.8375\frac{\log(D)}{a^2} + 1.6861\frac{\{\log(D)\}^2}{a^2} \\
 r^2 = & 0.9999 \quad (7)
 \end{aligned}$$

단위 소요면적당 압축강도에 대한 모형

벌크화물용 포장상자의 경우, 최적설계는 상자의 소요면적을 적게하면서 가능한한 압축강도가 커야하는 점

Table 2. The results of the response surface analysis for maximum compression strength per unit board area of container

Depth, cm	Volume, cm ³														
	10,000	20,000	30,000	40,000	50,000	60,000	70,000	80,000	90,000	100,000	110,000	120,000	130,000	140,000	150,000
20	0.1089 (0.566)	0.0771 (0.543)	0.0622 (0.531)	0.0531 (0.524)	0.0468 (0.518)	0.0421 (0.514)	0.0385 (0.511)	0.0355 (0.508)	0.0331 (0.505)	0.0311 (0.503)	0.0293 (0.502)	0.0278 (0.500)	0.0265 (0.499)	0.0253 (0.497)	0.0242 (0.496)
30	0.1001 (0.613)	0.0743 (0.585)	0.0617 (0.570)	0.0537 (0.560)	0.0481 (0.553)	0.0439 (0.547)	0.0405 (0.542)	0.0378 (0.538)	0.0355 (0.535)	0.0355 (0.532)	0.0318 (0.529)	0.0303 (0.527)	0.0290 (0.525)	0.0278 (0.523)	0.0268 (0.521)
40	0.0900 (0.648)	0.0689 (0.619)	0.0582 (0.603)	0.0514 (0.592)	0.0466 (0.583)	0.0429 (0.576)	0.0399 (0.571)	0.0374 (0.566)	0.0354 (0.562)	0.0336 (0.558)	0.0321 (0.555)	0.0307 (0.552)	0.0295 (0.550)	0.0284 (0.547)	0.0274 (0.545)
50	0.0810 (0.675)	0.0633 (0.647)	0.0542 (0.630)	0.0484 (0.618)	0.0441 (0.609)	0.0409 (0.602)	0.0383 (0.596)	0.0361 (0.591)	0.0343 (0.586)	0.0327 (0.582)	0.0313 (0.579)	0.0301 (0.575)	0.0290 (0.573)	0.0280 (0.570)	0.0271 (0.567)
60	0.0735 (0.697)	0.0582 (0.670)	0.0503 (0.653)	0.0452 (0.641)	0.0415 (0.632)	0.0386 (0.624)	0.0363 (0.618)	0.0344 (0.613)	0.0328 (0.608)	0.0313 (0.604)	0.0301 (0.600)	0.0290 (0.596)	0.0280 (0.593)	0.0271 (0.590)	0.0263 (0.588)
70	0.0672 (0.713)	0.0537 (0.688)	0.0468 (0.672)	0.0423 (0.660)	0.0390 (0.651)	0.0364 (0.643)	0.0344 (0.637)	0.0326 (0.632)	0.0312 (0.627)	0.0299 (0.622)	0.0288 (0.618)	0.0278 (0.615)	0.0269 (0.612)	0.0261 (0.609)	0.0253 (0.606)

(Note) ()단위 소요면적당 압축강도를 최대화하는 폭/길이 비

이다. 이 두 조건을 절충한 최적조건을 분석하기 위하여 상자의 단위 소요면적당 압축강도를 한 변수로 지정하였다.

앞에서의 소요면적과 압축강도에 대한 최적화 내용을 토대로 이 변수에 대한 반응표면 분석을 실시하였으며 (Fig. A16~Fig. A30), 이를 요약한 것을 Table 2에 나타내었다.

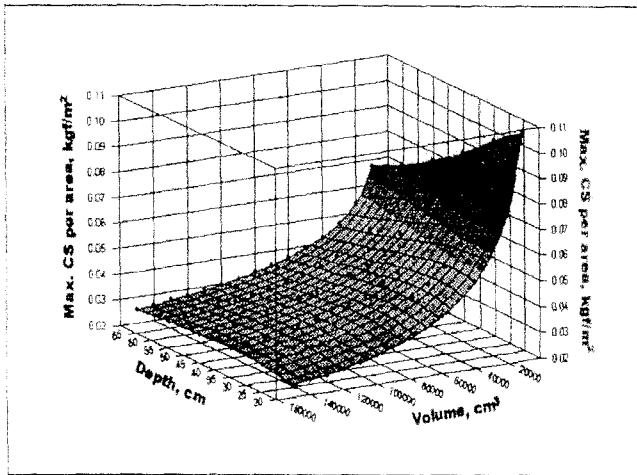


Fig. 4. Maximum compression strength per unit board area according to volume and depth of container

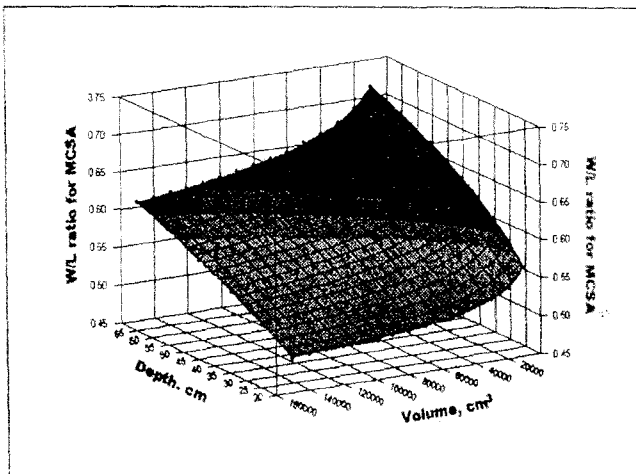


Fig. 5. Width/Length ratio for maximum compression strength per unit board area of container

Table 2로부터 임의의 체적에 대하여 상자의 소요면적과 압축강도 측면에서의 최적설계조건 즉, 단위 소요면적당 압축강도를 최대화하는 상자의 외형조건을 찾기 위해서는 이들 자료에 대한 수학적 모형화가 필요하다.

따라서 통계 팩키지인 DataFit v6.0을 이용하여 수학적 모델링한 결과를 식(8)과 식(9)에 각각 나타내었다 (Fig. 4, Fig. 5).

$$\begin{aligned}
 \text{MCSA} = & 0.3112 + \frac{29.6522}{D} - 0.0804 \{ \log(V) \} \\
 & - \frac{172.2917}{D^2} + 0.0074 \{ \log(V) \}^2 - 3.9820 \frac{\log(V)}{D^2} \\
 & + \frac{462.0912}{D^3} - 0.0002 \{ \log(V) \}^3 + 0.1368 \\
 & \frac{\{ \log(V) \}^2}{D} + 10.2473 \frac{\log(V)}{D^2}
 \end{aligned}$$

$$r^2 = 0.9999 \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 a_{\text{MCSA}} = & 0.4921 + 0.2177 \{ \log(D) \} - 0.0506 \{ \log(V) \} - \\
 & 0.0109 \{ \log(D) \}^2 + 0.0037 \{ \log(V) \}^2 - \\
 & 0.0131 \{ \log(D) \} \{ \log(V) \} - 0.0080 \{ \log(D) \}^3 \\
 & + 0.0004 \{ \log(V) \}^3 - 0.0037 \{ \log(D) \} \{ \log(V) \}^2 \\
 & + 0.0109 \{ \log(D) \}^2 \{ \log(V) \}, r^2 = 0.9999
 \end{aligned}$$

$$(9)$$

결과 및 고찰

치수비율에 따른 소요면적과 강도변화

벌크화물용 포장상자의 최적설계시에는 상자의 최소 소요면적, 강도적 특성 및 물류특면 등이 고려되어야 하기 때문에, 앞에서는 이들 인자 각각에 대하여 또는 복합된 인자에 대한 민감성과 이에 대한 최적화 모형을 각각 개발하였다.

상자의 체적이 일정하더라도 상자의 길이, 폭 및 높이의 치수비율에 따라 상자의 소요면적에 있어 큰 차이를 나타내었다(Fig. A1~Fig. A15). 즉, 동일한 체적과 높이에서 상자의 소요면적은 상자의 폭/길이 비가 증가함에 따라 감소하다 어느 기점을 중심으로 다시 증가하는 경향을 보였다. 그러나 이와반대 조건인 상자의 폭/길이 비가 일정하고 소요체적이 작을때는 상자의 높이에 따라 감소하다 어느 기점을 중심으로 다시 증가하는 경향이었으나, 소요체적이 비교적 클 경우에는 상자의 높이에 따라 감소하는 경향을 보였다.

동일한 상자의 체적을 형성하면서 상자의 높이 별로 최소소요면적 조건을 도기한 Fig. 1과 Fig. 2에서 보는 바와같이, 동일한 체적에서 상자의 높이가 증가함에 따라 최소소요면적은 감소하다 어느 기점을 중심으로 다시 증가하는 경향을 보였다.

상자의 길이, 폭 및 높이의 치수비율에 따른 압축강도에서도 비교적 큰 차이를 나타내었는데, 상자의 압축강도는 상자의 각 높이에서 폭/길이 비가 증가함에 따라 증가하다 어느 기점을 중심으로 다시 감소하였다. 또한 상자의 폭/길이 비가 동일할 경우 상자의 높이에 따라 압축강도는 점차 감소하는 경향을 나타내었으며, 상자의 각 높이별로 최대압축강도를 나타내는 폭/길이 비는 대체로 0.5~0.6 부근 이었다.^(17,18)

상자의 단위 소요면적당 압축강도의 최대 조건을 도기한 Fig. 4와 Fig. 5를 보면, 동일한 체적에서 상자의 높이가 증가함에 따라 폭/길이 비가 증가하다 어느 기점을 중심으로 다시 감소하는 경향을 보였다. 그 분기점의 위치는 상자의 체적에 따라 변화하였고, 또한 상자의 높이가 일정할 경우, 체적이 증가할 수록 크게 감소하는 경향을 나타내었다.

모형의 민감성과 적용

상자의 소요면적과 단위 소요면적당 압축강도에 대한 반응표면 분석을 통하여 개발된 최적화 모형들(식(5)~식(9))에 대한 민감성 분석을 위하여 Table 3에 나타낸

체적이 27,000cm³으로 일정하고, 상자의 높이가 20, 40 및 60cm일 때의 실측된 자료가 활용되었다.

소요면적에 대한 최적화 모형인 식(5)와 식(6)에 의해 상자의 체적이 27,000cm³이고, 높이가 20, 40 및 60cm 일때의 최소소요면적과 그때의 폭/길이 비를 각각 추정 한 결과, 최소소요면적에서는 6957.2, 6353.2, 6611.8cm², 폭/길이 비에서는 0.32, 0.52, 0.64이었다. 한편, 단위면적당 최대압축강도는 0.0660, 0.0608, 0.0521 이며, 그때의 폭/길이 비는 0.57, 0.64, 0.69로 각각 추정되었다.

이 추정된 값들은 Table 3의 소요면적과 단위 소요면적당 압축강도 값들의 크기에 대한 비교로부터 찾은 적정조건과 잘 일치하였다. 따라서 식(5)~식(9)의 모형 으로부터 상자의 체적과 높이에 따른 최소소요면적 조건과 단위면적당 압축강도의 최적조건을 잘 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

벌크화물용 포장상자의 설계시에는 상자의 외형치수에 특별한 제한을 두지 않는 경우, 자동화 포장공정상 상자의 높이를 일정한 값으로 제한하는 경우, 포장후 팽 리트나 차량의 적재효율을 우선 고려하여 상자의 바깥 치수인 길이와 폭이 미리 결정되는 경우로 나누어 볼수 있고, 또한 각 경우에 있어 상자의 최소소요면적, 강도 적 측면 또는 이 두 요소를 모두 고려하는 각 경우마다 상자의 최적설계조건을 찾는데 적용한 수학적 모형과 적용방법을 요약하면 Table 4와 같다.

Table 3. The results of the prediction of optimum conditions for required board area and compression strength per unit board area of container

Height (cm)	Length (cm)	Width (cm)	Ratio (L/W)	Volume (cm ³)	Board Area (cm ²)	Compression Strength (kg/cm ²)	Ratio (L/W)	Compression Strength (kg/cm ²)
20	58.1	23.2	0.4	7034.3	433.9	0.0617		
20	47.4	28.5	0.6	7347.4	480.7	0.0654	6957.2	0.0660
20	41.1	32.9	0.8	7824.1	479.7	0.0613	(0.32)	(0.57)
20	36.7	36.7	1.0	8323.6	473.4	0.0569		
40	41.1	16.4	0.4	6495.1	354.6	0.0546		
40	33.5	20.1	0.6	6442.7	392.9	0.0610	6353.2	0.0608
40	29.1	23.2	0.8	6629.2	392.1	0.0591	(0.52)	(0.64)
40	26.0	26.0	1.0	6864.0	386.9	0.0564		
60	33.5	13.4	0.4	6884.9	315.0	0.0458		
60	27.4	16.4	0.6	6702.3	349.1	0.0521	6611.8	0.0521
60	23.7	19.0	0.8	6736.9	348.5	0.0517	(0.64)	(0.69)
60	21.2	21.2	1.0	6885.8	343.8	0.0499		

(Note 1) 1)단위 소요면적 2)단위면적당 최대압축강도, ()폭/길이 비

Table 4. Application methods of mathematical models developed in this study

Design directions	Exterior packaging conditions		
	Not limit	Limit of depth	Limit of length and width
Board area	Eq.(5), Eq.(6) $\left. \begin{array}{l} \frac{d(RMA)}{dD} \end{array} \right\} \min$	Eq.(6)	-
Compression strength	Eq.(7)	Eq.(7)	-
Board area and compression strength	Eq.(8), Eq.(9) $\left. \begin{array}{l} \frac{d(MCSA)}{dD} \end{array} \right\} \max$	Eq.(8)	-

결론

이 연구에서는 벌크화물용 포장상자의 최적설계를 위한 알고리즘으로써 상자의 최소소요면적(RMA), 압축강도(CS) 및 단위 소요면적당 최대압축강도(MCSA)에 대한 수학적 모형을 다음과 같은 형태로 각각 개발하였다.

$$RMA = f(V, D), a_{RMA} = f(V, D),$$

$$MCSA = f(V, D), a_{MCSA} = f(V, D)$$

이들 모형을 개발하기 위하여 상자의 치수비율 변화에 따른 상자 압축실험과 최소소요면적, 압축강도 및 단위 소요면적당 최대압축강도에 대한 반응표면 분석을 실시하였다.

개발한 최적화 모형에 있어 주요 독립변수로는 상자의 체적과 높이이며, 이들 모형들에 대한 민감성 분석결과, 이들 모형으로부터 벌크화물의 포장중량에 따라 형성되는 체적을 바탕으로 설계목적별 및 설계 제한조건별로 목적하는 각 경우에 맞는 상자의 최적설계가 가능한 것으로 판단되었다. 따라서 개발된 모형들은 앞으로 벌크화물용 포장상자의 최적설계 소프트웨어를 개발하는데 중요한 알고리즘으로써 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

기호설명

a = 상자의 폭/길이 비
 a_{MCSA} = 단위 소요면적당 압축강도를 최대화하는 폭/길이 비

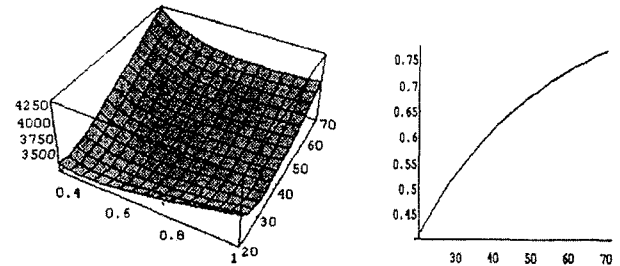
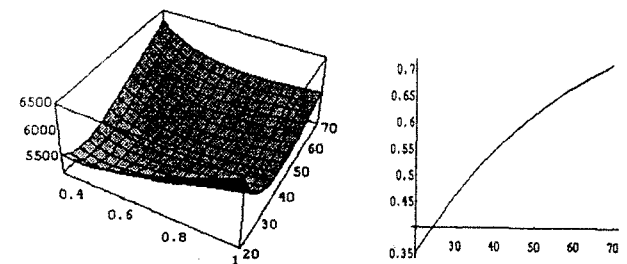
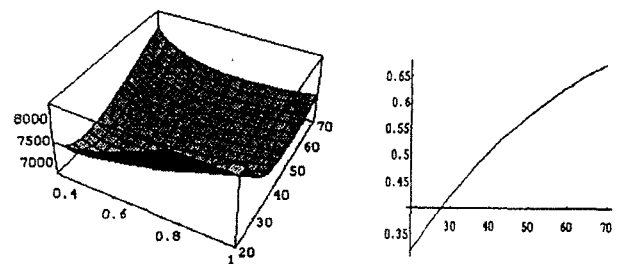
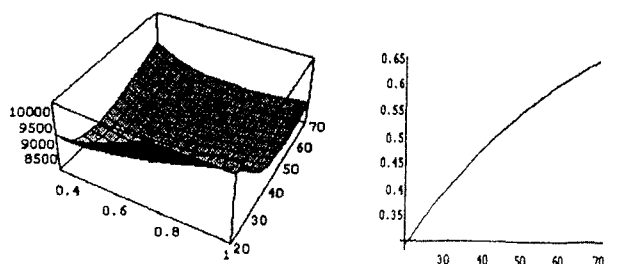
a_{RMA} = 상자의 최소소요면적을 위한 폭/길이 비
 CS = 상자의 압축강도, kgf
 D = 상자의 높이, cm
 MCSA = 상자의 단위 소요면적당 최대압축강도, kgf/cm²
 RMA = 상자의 최소소요면적, cm²
 V = 상자의 소요체적, cm³

문헌

- Hanlon, J. F. 1984. Handbook of packaging engineering. McGraw-Hill. NY
- Maltenfort, G. G. 1961. Optimum package dimensions save board. Packaging Engineering 6(6): 88-99, 6(7): 76-94
- Maltenfort, G. G. 1989. Performance and evaluation of shipping containers, Jelmar Publishing Co., Inc.
- Wright, P. G. 1974. Minimizing board requirements while maximizing protection & shipping space. A system approach to package design. Paperboard Packaging 7-Part series.
- Billerad Handbook. Testing of corrugated board and its components
- DieMex Y. 1997, 1998. 段ボール原典シリーズ. CARTON BOX: 第0回-第10回
- Gartaganis, P. A. 1975. Strength properties of corrugated containers. Tappi 58(11): 102-108
- Johnson, M. W., T. J. Urbanik, W. E. Denniston. 1980. Maximizing top-to-bottom compression strength. Paperboard Packaging 98

부록

9. J nson, G. 1995. Corrugated board packaging. The Ipswich Book Company
10. Kutt, H. and B. B. Mithel. 1968. Studies of compressive strength of corrugated containers. Tappi Journal 51(4)
11. Kutt, H. and B. B. Mithel. 1969. Structural strength characteristics of containers. Tappi 52(9): 1685
12. Leake, C. H. 1988. Measuring corrugated box performance. Tappi Journal(Oct): 71-75
13. Maltenfort, G. G. 1988. Corrugated shipping containers: an engineering approach. Jelmar Publishing Co.
14. 五十嵐清一. 1996. 段ボール包装技術. 日報
15. Wolf, M. 1974. Here's a quick way to calculate box compression strength. Package Eng. Feb. : 44-45
16. 朴鍾民외 1. 1999. 종이성형 구조물의 구조적 강도에 대한 이론분석과 유한요소해석. 한국포장학회지 5(1): 13-20
17. 全農施設資材部. 1982. 青果物豫冷施設のてびき. p46-60
18. 全農施設資材部. 1993. 段ボールの基礎知識. 段ボール資材講習會. p45-57
19. Brown, D. P. et al. 1991. Calculus & Mathematica. Basics, Tutorials and Literacy Sheets. Addison-Wesley Publishing Company
20. ASTM D642. Standard method for determining compressive resistance of shipping containers, components, and unit loads
21. KS A1012. 포장화물 및 용기의 압축실험 방법
22. TAPPI T804. Compression test of fiberboard shipping containers
23. ASTM D685. Practice for conditioning paper and paper products for testing

Fig. A1. RSA for RBA [$V=10,000\text{cm}^3$]Fig. A2. RSA for RBA [$V=20,000\text{cm}^3$]Fig. A3. RSA for RBA [$V=30,000\text{cm}^3$]Fig. A4. RSA for RBA [$V=40,000\text{cm}^3$]

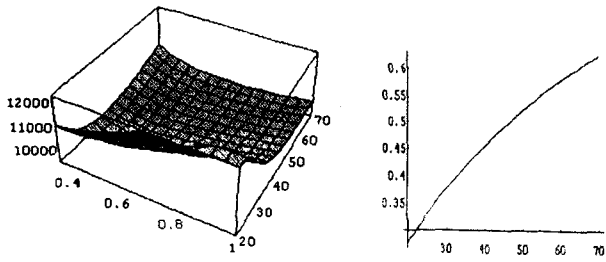


Fig. A5. RSA for RBA [V=50,000cm³]

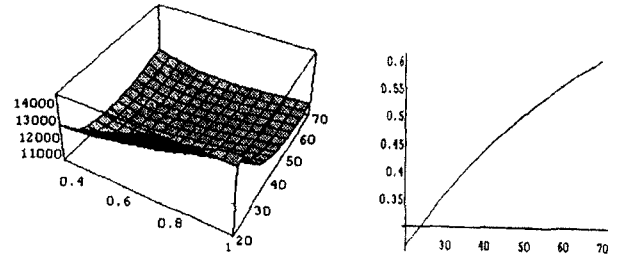


Fig. A6. RSA for RBA [V=60,000cm³]

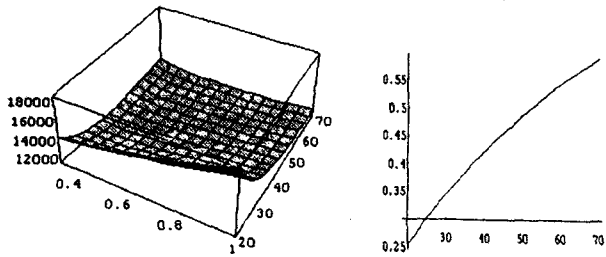


Fig. A7. RSA for RBA [V=70,000cm³]

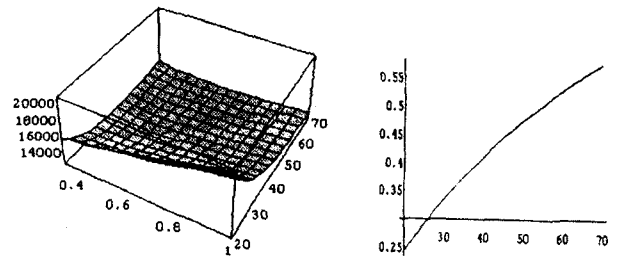


Fig. A8. RSA for RBA [V=80,000cm³]

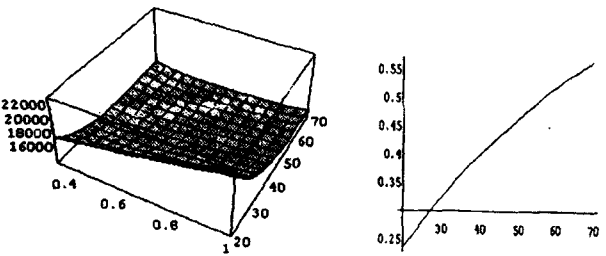


Fig. A9. RSA for RBA [V=90,000cm³]

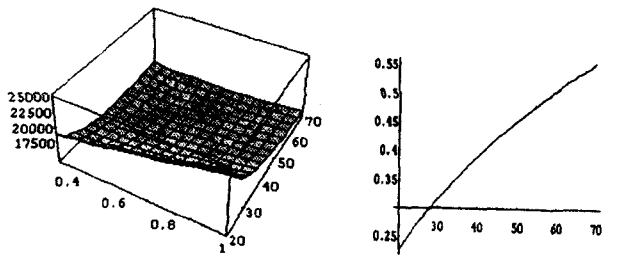


Fig. A10. RSA for RBA [V=100,000cm³]

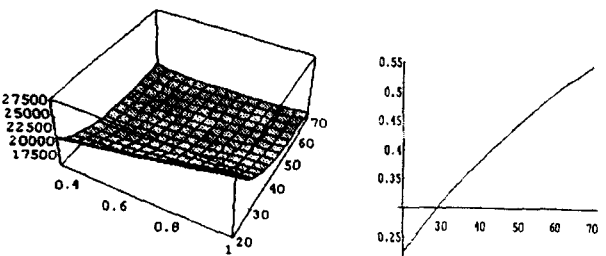


Fig. A11. RSA for RBA [V=110,000cm³]

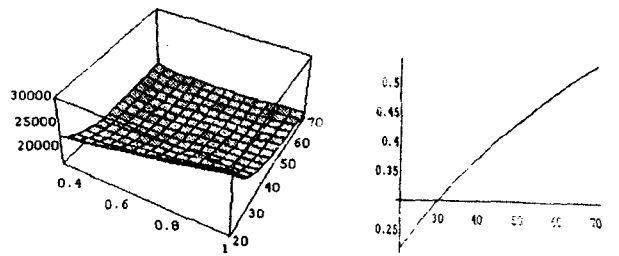


Fig. A12. RSA for RBA [V=120,000cm³]

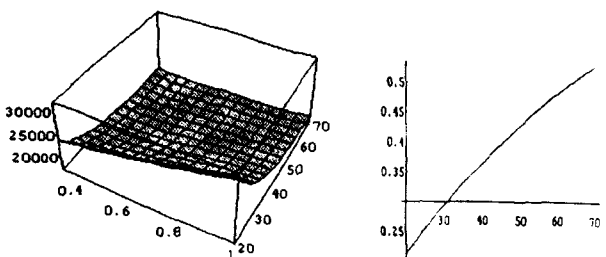


Fig. A13. RSA for RBA [V=130,000cm³]

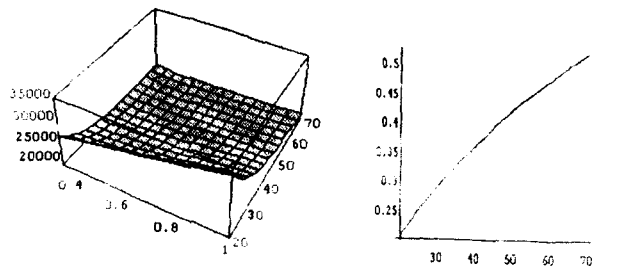


Fig. A14. RSA for RBA [V=140,000cm³]

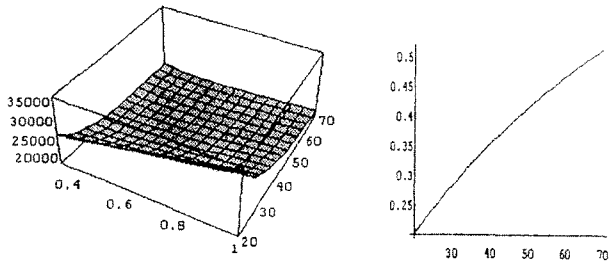


Fig. A15. RSA for RBA [V=150,000cm³]

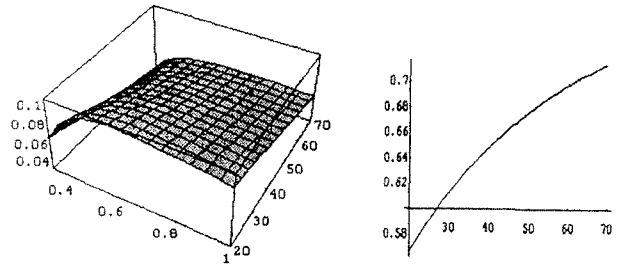


Fig. A16. RSA for MCSA [V=10,000cm³]

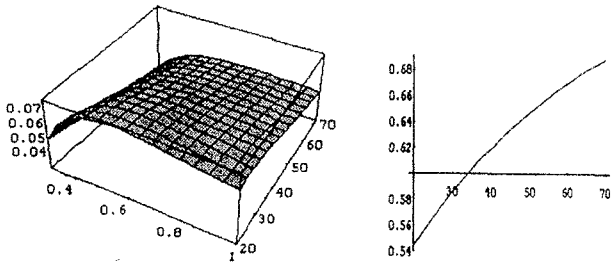


Fig. A17. RSA for MCSA [V=20,000cm³]

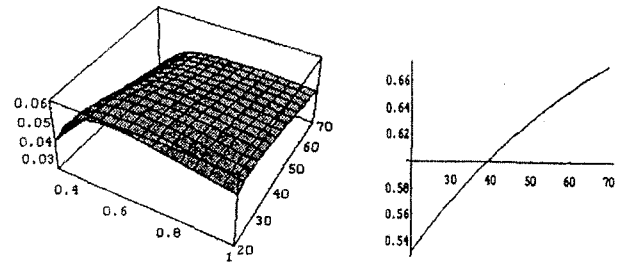


Fig. A18. RSA for MCSA [V=30,000cm³]

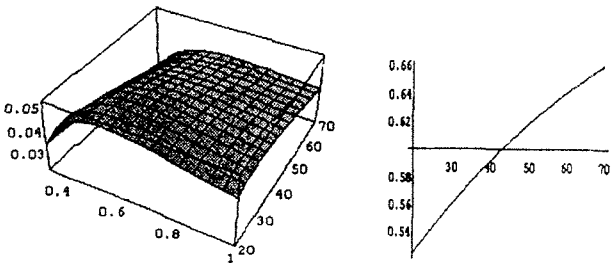


Fig. A19. RSA for MCSA [V=40,000cm³]

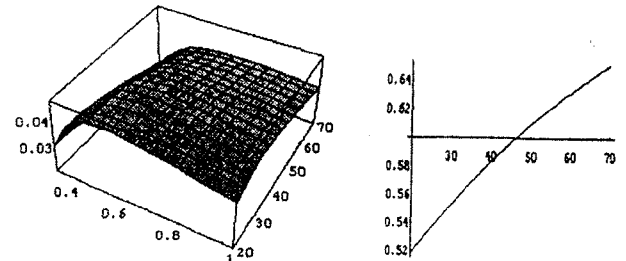


Fig. A20. RSA for MCSA [V=50,000cm³]

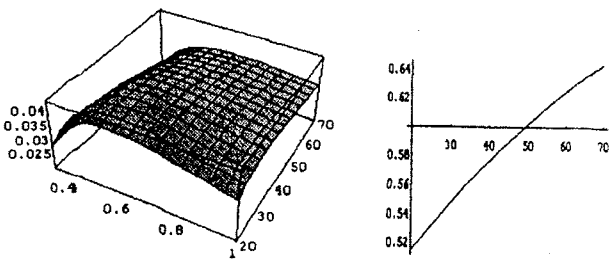


Fig. A21. RSA for MCSA [V=60,000cm³]

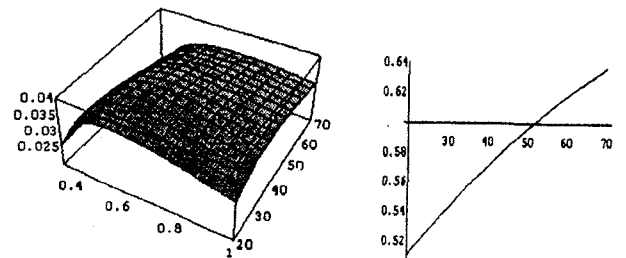


Fig. A22. RSA for MCSA [V=70,000cm³]

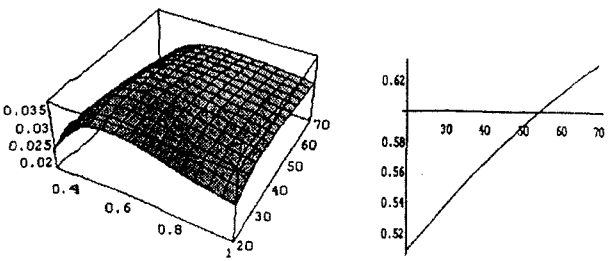


Fig. A23. RSA for MCSA [V=80,000cm³]

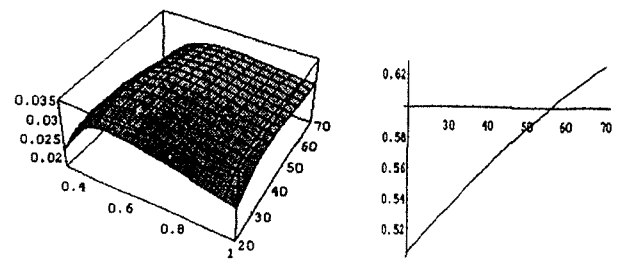


Fig. A24. RSA for MCSA [V=90,000cm³]

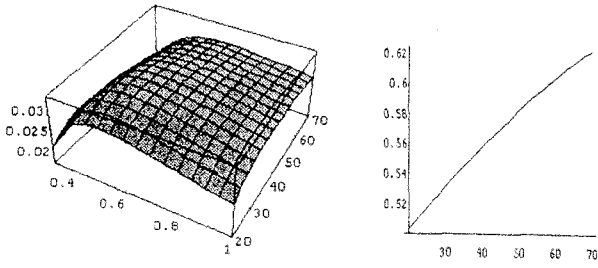


Fig. A25. RSA for MCSA [V=100,000cm³]

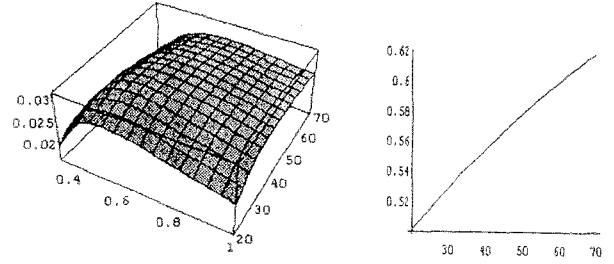


Fig. A26. RSA for MCSA [V=110,000cm³]

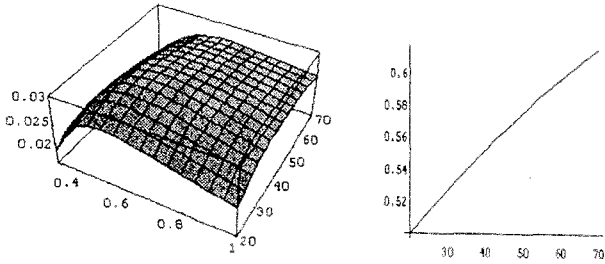


Fig. A27. RSA for MCSA [V=120,000cm³]

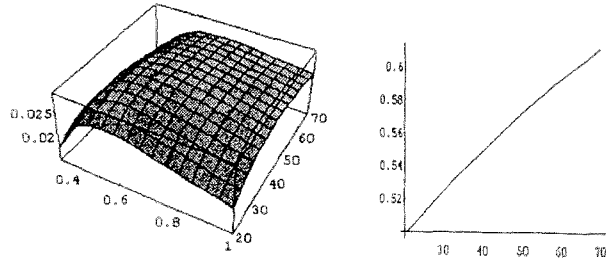


Fig. A28. RSA for MCSA [V=130,000cm³]

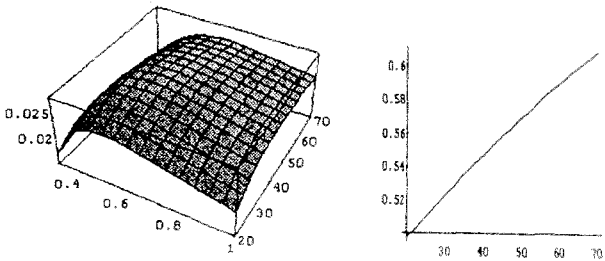


Fig. A29. RSA for MCSA [V=140,000cm³]

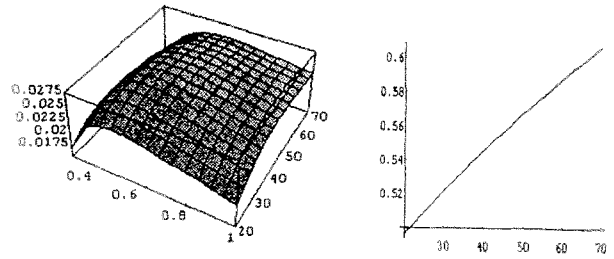


Fig. A30. RSA for MCSA [V=150,000cm³]