

등급 양방향 진화적 구조 최적화 기법을 이용한 구형 압력용기 노즐부의 형상최적화

이영신* · 류충현**

Shape Optimization on the Nozzle of a Spherical Pressure Vessel Using the Ranked Bidirectional Evolutionary Structural Optimization

Young-Shin Lee, Chung-Hyun Ryu

Key Words : Performance Indicator ; PI(성능지수), Fully Stressed Design(전응력설계), Rejection Ratio ; RR(제거률), Inclusion Ratio ; IR(첨가률), Evolution Ratio ; ER(진화률)

Abstract

To reduce stress concentration around the intersection between a spherical pressure vessel and a cylindrical nozzle under various load conditions using less material, the optimization for the distribution of reinforcement has researched. The ranked bidirectional evolutionary structural optimization(R-BESO) method is developed recently, which adds elements based on a rank, and the performance indicator which can estimate a fully stressed model. The R-BESO method can obtain the optimum design using less iteration number than iteration number of the BESO. In this paper, the optimized intersection shape is sought using R-BESO method for a flush and a protruding nozzle. The considered load cases are a radial compression, torque and shear force.

1. 서 론

압력용기에서 노즐과 결합되는 부위는 가장 취약한 부분이다. ASME 를 비롯한 각국의 압력용기 기술기준에서는 노즐 설계에 있어서 개구부의 면적을 보강하는 면적보강법을 추천하면서 유한요소 해석과 같은 방법으로 해석을 수행하여 보강부의 응력을 확인할 것을 제시하고 있다. 면적 보강법에서 보강영역은 노즐 원통의 직경과 압력용기의 두께의 함수로 표시된다.

구형 압력용기에 반경방향으로 설치되는 노즐은 압력용기노즐의 대표적인 설계 중의 하나로 원자력 발전소를 포함한 일반 산업체에 널리 사용된다. 비교적 내압이 낮아 구형 압력용기의 두께가 얇은 경우에는 보강패드를 노즐주위에 설치하여 노즐을 보강한다. 내압이 높아 구형 압력용기의 두께가 두꺼운 경우 압력용기와 노즐의 용접성과

작업성을 향상시키기 위하여 일반적으로 단조품을 가공한 노즐 일체형 및 셸 일체형으로 노즐을 보강한다.

진화적 구조 최적화(evolutionary structural optimization ; ESO) 기법은 1992 년에 호주 시드니 대학의 Steven 교수에 의해 개발된 이래로 지속적으로 연구되어왔으며 다양한 문제에 적용하여 기법의 유용성을 입증하였다.⁽¹⁾ 이 기법은 공학구조물의 위상과 형상은 안전을 기준으로 할 때 자연적으로 보수성을 갖게 되어 재료를 과다하게 포함한다는 관점에 착안하여, 구조물이 구조적 성능을 발휘하는데 기여도가 작은 재료(inactive material)를 구조물에서 제거한다는 개념이다. 이 기법의 장점은 개념이 단순하여 이해가 빠르고, 기존에 개발되어 있는 상용 유한요소 해석 프로그램에 적용이 용이하다는 것이다.

국내에서 연구는 류충현, 이영신⁽²⁾은 ESO 기법을 이용하여 판과 곡률이 있는 판이 다양한 경계 조건과 하중조건을 가질 경우의 개구부의 최적화를 수행하였으며 AESO 기법과 비교하였다. Han 은 기존의 ESO 기법을 개선한 기법을 소개하였다.

* 회원, 충남대학교 기계설계공학과

** 회원, 충남대학교 대학원 기계설계공학과

본 연구에서는 기존의 양방향 진화적 구조 최적화(BESO) 기법에 근거한 새로운 기법인 등급 양방향 진화적 구조 최적화(rankd BESO ; R-BESO) 기법을 이용하여 구형압력용기와 원형노즐의 결합부에 대한 보강부의 최적위상을 구한다. 목적함수는 요소수와 응력의 항으로 이루어진 성능지수가 적용되었으며 이를 최소화하여 최소 중량을 갖는 전응력설계를 얻는다. flush 노즐과 protruding 노즐이 고려되었으며 반경방향 압축력, 비틀림 그리고 전단력이 작용하중으로 사용되었다.

2. 구형압력용기와 원형노즐 결합부의 형상 최적화

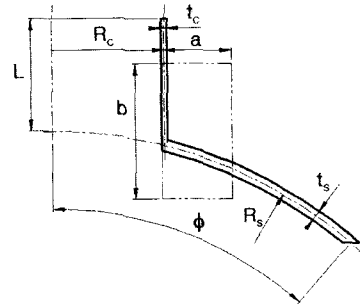
반경방향 원형노즐과 교차되는 구형 압력용기의 결합부의 설계작업은 최소 재료를 이용하여 응력을 분포시킬 수 있고 최대 응력값이 제한된 값보다 작도록 하는 최적형상을 구하는 작업을 말한다. 일반적으로 노즐은 flush 노즐과 protruding 노즐로 구분할 수 있으며 본 연구에서도 두 형태 모두가 고려되었다. 원형노즐과 구형 압력용기는 축대칭의 형상을 갖으며 Fig. 1 은 고려된 두 노즐형태의 개략도를 나타낸다. 노즐의 길이 L 과 ϕ 는 예비구조해석에서 경계조건과 하중조건에 의한 끝단 효과가 발생하지 않는 범위인 1000mm, 41°로 정하였다. 구형 압력용기의 반경과 두께는 각각 $R_s=4000\text{mm}$, $t_s=100\text{mm}$ 원형노즐의 반경과 두께는 각각 $R_c=1000\text{mm}$, $t_c=50\text{mm}$ 이다. 그리고, protruding 노즐의 경우에는 구형 압력용기 내부로 삽입되는 원형노즐이 존재하게 되는데 삽입되는 길이 $c=30\text{mm}$ 이다. 요소가 첨가되거나 제거되는 영역인 설계영역은 면적보강법에서 제시하는 특성길이를 적용하여 $a=60\text{mm}$, $b=120\text{mm}$ 로 정하였다.

고려된 하중의 형태는 노즐을 통하여 구형 압력용기에 가해질 수 있는 여러 가지 외력들로 Fig. 2 에 나타내었다. 구형 압력용기의 끝단은 고정으로 하였으며 원형노즐의 끝에 반경방향 압축력 F , 원주방향 비틀림 T , 그리고 전단력 V 를 각각 작용시켰다.

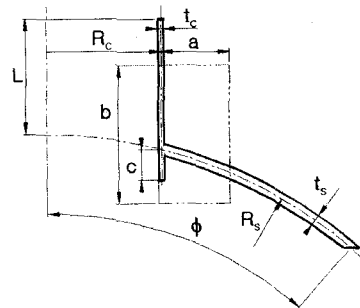
최소 중량을 갖으며 전응력상태의 구조물을 설계하기 위해서는 중량과 응력을 포함하는 새로운 성능지수(PI)가 필요하다. 그러므로 성능지수를 목적함수로 이용하여 이를 최소화할 수 있는 위상을 얻는다.

$$PI = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{av}) N_e}{\sigma_{ref}} \quad (1)$$

여기서 σ_{\max} 는 유한요소모델의 최대 von Mises 응력이고 σ_{av} 는 유한요소모델의 평균 von Mises 응력이며, N_e 는 유한요소모델의 요소수를 나타낸다. 그리고, σ_{ref} 는 기준 응력으로서 본 연구에서는 최초모델의 평균 von Mises 응력을 이용하였다. 성능지수를 목적함수로 적용하여 R-BESO 를 수식으로 정리하면 다음과 같다.



(a) Flush nozzle



(b) Protruding nozzle

Fig. 1 Schematic diagrams of the nozzle and spherical vessel geometries

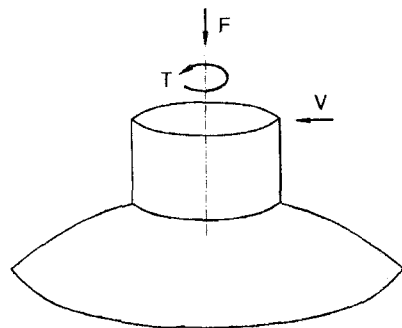


Fig. 2 Type of applied loads to a nozzle

Minimize :

$$f(x) = PI = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{av}) N_e}{\sigma_{ref}} \quad (2)$$

Subject to :

$$\sum_{e=1}^{N_e} [Ku]_e - \{F\} = 0 \quad (3)$$

$$x \left[\sigma_e - \left\{ \sigma_{av} - RR(\sigma_{av} - \sigma_{\min}) \right\} \right] \geq 0 \quad (4)$$

$$x \left[\sigma_e - \left\{ \sigma_{av} + IR(\sigma_{\max} - \sigma_{av}) \right\} \right] \geq 0 \quad (5)$$

$$x = \{0, 1\} \quad (6)$$

여기서 σ_e 는 각 요소의 von Mises 응력이며 σ_{\max} 와 σ_{\min} 는 유한요소모델의 최대와 최소 von Mises 응력이다. 그리고 RR 과 IR 은 각각 제거률과 첨가률이며 설계변수인 x 는 0 이면 모델에 요소가 포함되지 않은 상태를 의미하고 1 이면 요소가 포함된 상태를 의미한다.

3. 등급 양방향 진화적 구조 최적화 과정

R-BESO 기법은 요소첨가과정과 요소제거과정을 포함한다. 최적화는 Fig. 3 에서 보여진 최초 유한요소모델에서 시작되어지며 최초 모델의 요소들은 최적화를 진행하면서 제거될 수 없도록 정하였다. 이러한 최초 구조에서 평가기준에 근거해 요소첨가와 제거과정을 반복수행하여 최적 위상을 얻게 된다. 따라서 진화초기에는 첨가되는 요소가 제거되는 요소에 비해 많으므로 모델의 요소수는 증가하게 된다. 그러나, 후기에는 요소의 증가로 인한 응력감소의 영향보다 중량증가 즉, 요소증가에 영향을 크게 미치므로 제거되는 요소가 많아진다.

R-BESO 기법의 고정을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 구조물이 차지할 수 있는 최대 가용 영역 즉, 설계영역과, 하중 및 지지점의 위치를 정한다.
- (2) 일정한 크기의 사각형 요소로 설계영역을 조밀하게 메쉬한다.
- (3) 최초모델에 하중과 경계조건을 정의한다.
- (4) 첨가률(IR), 제거률(RR)과 진화률(ER)을 선택한다.
- (5) 최적화의 제한조건을 정한다.
- (6) 유한요소해석을 수행한다.
- (7) 해석된 결과를 이용하여 모델의 최대, 최소 그리고 평균응력을 계산한다.
- (8) 모델에서 요소첨가과정에 이용될 자유단을

갖는 후보요소를 선택한다.

- (9) 평균응력을 기준으로 하여 상한계와 하한계를 결정한다.

$$\sigma_U = \sigma_{av} + IR(\sigma_{\max} - \sigma_{av}) \quad (7)$$

$$\sigma_L = \sigma_{av} - RR(\sigma_{av} - \sigma_{\min})$$

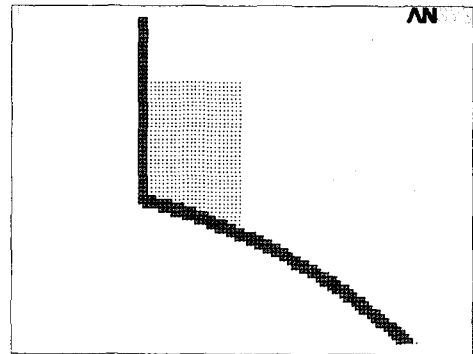
- (10) 후보요소 중 상한계보다 높은 응력을 갖는 요소에 대해서는 각 자유단에 등급을 결정하고 이에 근거하여 요소를 생성한다. 그리고 모델의 모든 요소에 대해 하한계보다 작은 응력을 갖는 요소는 제거된다.

- (11) 첨가과정과 제거과정을 통해 진화된 모델이 진화제한조건(evolution constraint)을 만족하는지를 비교하여 만족하지 않을 경우에는 진화률을 이용하여 새로운 첨가률과 제거률로 바꾼 후 단계(9)부터 다시 진행하여 진화제한조건을 만족할 때까지 반복한다.

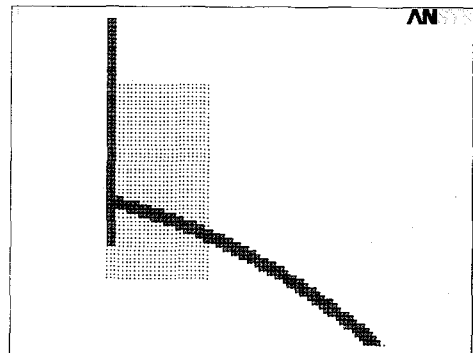
$$IR_{new} = IR_{old} + ER \quad (8)$$

$$RR_{new} = RR_{old} + ER$$

- (12) 진화된 모델에 대해 성능지수를 구하고 이 값이 최적화 한계에 도달할 때까지 단계(6)부터 반복수행한다.



(a) Flush nozzle



(b) Protruding nozzle

Fig. 3 Initial finite element model

- (13) 등급결정과정을 포함하지 않는 과정을 이용하여 일련의 과정을 수행한다.
- (14) 성능지수가 최적화 한계에 도달할 때까지 단계(13)를 반복수행한다.

4. 결과 및 토의

4.1 Flush 노즐

Fig. 4는 flush 노즐에 대한 최적화 과정에서 얻어진 성능지수와 요소수 그리고 평균응력을 각각 고려된 하중에 대해 나타내었다. 반경방향 압축력에 대한 경우, 성능지수는 반복횟수 4까지 급격히 감소되며 그 후 미소한 변화를 보이며 진행되어 반복횟수 16에서 최소값을 보인다. 반면 요소수는 반복횟수 4까지 급격히 증가하였으며 그 후 점차 감소하는 경향을 보인다. 비틀림이 노즐에 작용하는 경우에는 성능지수와 요소수의 변화가 동일한 경향을 보인다. 이는 성능지수의 응력편차의 항이 비활성화되어 요소수만이 성능지수에 영향을 미치는 활성인자로 남기 때문이라고 유추할 수 있다. 최적값 즉, 성능지수의 최소값은 최초모델에서의 값이다. 전단력이 작용하는 경우에는 성능지수가 반복횟수 3까지 급격하게 감소하여 최적값에 이른 후 다소 증가하여 거의 일정하게 유지된다. 이 경우는 다른 경우와 달리 반복횟수 초반에 최적값에 이르며 이때의 요소수는 상당히 큰 것을 확인할 수 있고 이것은 응력편차가 매우 작다는 것을 의미한다. 요소수는 반복횟수 4까지 급격히 증가한 후 점차 감소하는 경향을 보인다. 반경방향의 압축력의 경우에 가장 적은 반복횟수에 수렴하며 비틀림의 경우에 가장 많은 반복횟수에 수렴한다. 평균응력은 초기의 반복횟수에서 큰 감소를 보이고 점차 감소하였다가 증가되는 경향을 보인다. Fig. 4-(d)에서 화살표는 각 하중경우에 대한 최적화된 모델의 평균응력을 나타내는 것이다. 전단력이 작용할 경우에는 초기 모델의 약 56%에 해당되는 평균응력값을 보이며, 비틀림의 경우는 100%, 반경방향 압축력의 경우는 약 47%에 해당되는 응력값을 보인다.

Fig. 6은 최적화 과정을 통해 얻은 최적 모델을 나타낸다. 반경방향 압축력의 경우에는 (a)와 같이 결합부에 보강재가 분포되며 구형셀, 노즐과 보강재 사이에 공간이 형성된다. (b)는 비틀림이 작용할 경우의 최적모델이며 최초모델이다. (c)는 전단력이 작용할 경우의 결과로 반경방향 압축력의 경우에 비해 작은 보강재 영역을 가지며 내부에 공간이 없다.

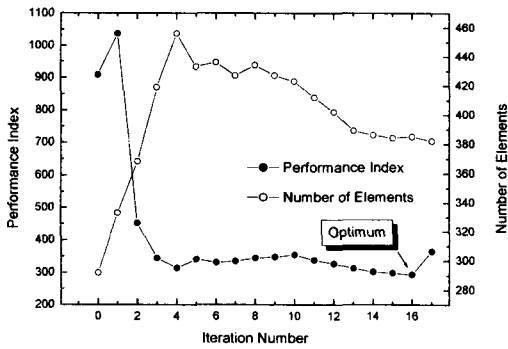
4.2 Protruding 노즐

Fig. 5는 protruding 노즐에 대한 반복계산에 따른 성능지수, 요소수 그리고 평균응력을 보인다. flush 노즐의 결과와 유사하게 반경방향 압축력과 횡방향 전단력이 작용하는 경우에는 성능지수와 모델의 요소수가 반대되는 경향을 보이거나 비틀림이 작용하는 경우에 있어서는 성능지수와 요소수가 동일한 경향을 보인다. 최적값에 이르는 반복횟수는 반경방향 압축력의 경우와 전단력의 경우에 모두 3으로 초기에 최적모델을 얻을 수 있다. 비틀림이 작용할 경우에서 반복횟수 초기에 급격히 증가한 요소수는 반복횟수 4에서 최대값을 보이며 점차로 감소한다. 성능지수도 마찬가지로 경향을 보이므로 성능지수의 최소값 즉, 최적값은 최초모델에 대한 값으로 최초모델이 최적화된 모델이다. (d)는 각 하중조건에 따른 평균응력을 최적화 과정에서 보였다. 과정이 진행됨에 따라 평균응력은 감소하며 초기 과정에서 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 최적화된 모델에 대한 평균응력은 최초모델에 비해 전단력의 경우에 약 51%, 비틀림의 경우에 100%, 그리고 반경방향 압축력의 경우에 약 52%의 값에 해당되는 평균응력을 보인다.

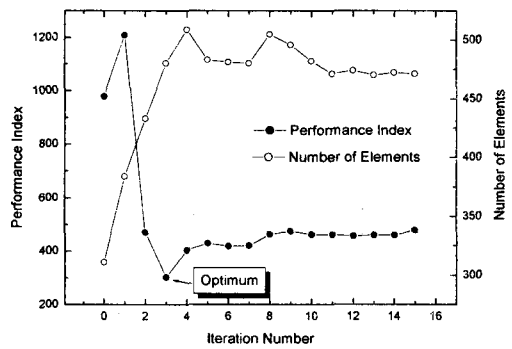
최적화된 모델의 형상은 Fig. 7에 나타내었다. 설계영역을 구형 압력용기의 안쪽까지 설정하였기 때문에 용기의 내부에도 보강재가 분포된 것을 알 수 있다. 반경방향 압축력이 작용할 경우와 전단력이 작용할 경우에서 용기의 안쪽면에 보강재가 분포하는 형상은 두 경우가 동일하나 용기 바깥쪽면은 반경방향 압축력의 경우가 더 완만한 곡률반경을 갖는다. 비틀림에 대한 최적화된 모델은 최초모델이다.

5. 결론

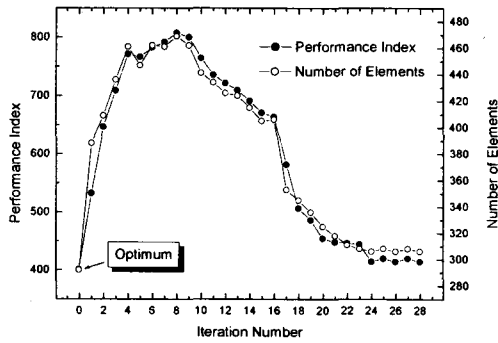
본 연구는 구형 압력용기와 원형 노즐의 결합부에 대하여 노즐의 끝단에 외부하중 즉, 반경방향 압축력, 비틀림 그리고 전단력이 작용할 경우 보강재의 최적 위상을 등급 양방향 진화적 최적설계기법을 이용하여 구하였다. 이용된 목적함수는 구조물의 중량을 나타내는 지표가 될 수 있는 요소수와 응력편차의 항으로 이루어진 성능지수이고 최적화는 이를 최소화하는 것이다. 고려된 하중은 각각 독립적으로 고찰되었으며 최적화된 모델의 형상을 제시하였다. 고려된 노즐은 일반적인 flush 노즐과 protruding 노즐에 대해 적용하였다. 이상의 결과들에서 다음의 결론을 얻을 수 있다.



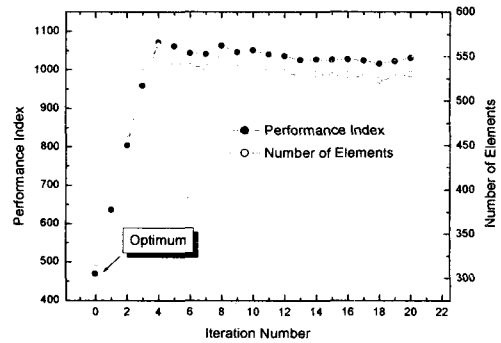
(a) Radial compression



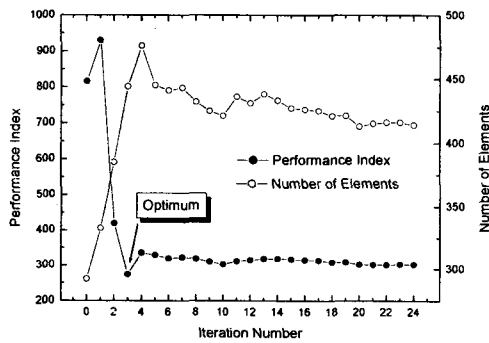
(a) Radial compression



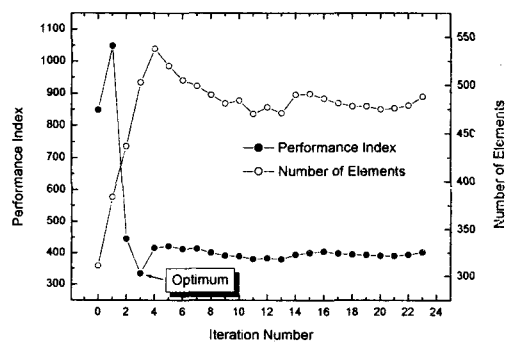
(b) Torque



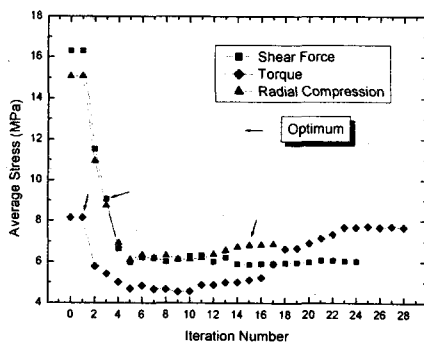
(b) Torque



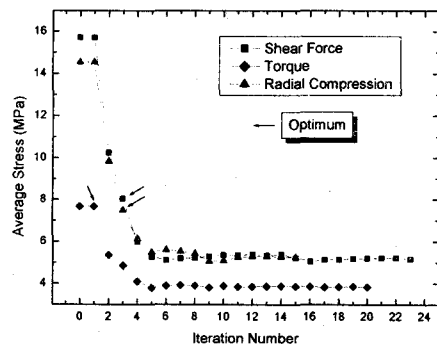
(c) Shear force



(c) Shear force



(d) Average stress



(d) Average stress

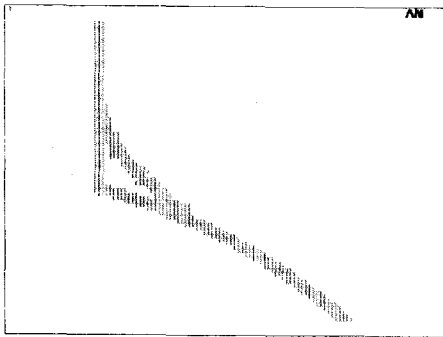
Fig. 4 Optimization history on flush nozzle

Fig. 5 Optimization history on protruding nozzle

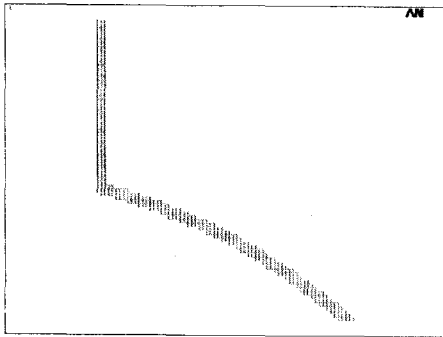
참고문헌

- (1) 용기와 노즐의 결합부에서의 보강재에 대한 최적위상은 최적화 과정의 초기단계에서 얻어진다.
- (2) 비틀림의 경우에는 두 노즐 모두 보강재가 없는 최초모델이 최적화된 모델이다.
- (3) 전단력이 작용할 경우와 반경방향 압축력이 작용할 경우에 최적화된 모델의 평균 응력은 최초모델의 약 50%의 응력값을 갖는다.
- (4) 등급 양방향 진화적 최적설계기법은 용기와 노즐결합부의 최소중량을 갖는 전응력 설계에 대한 보강재의 최적위상을 구하는데 유용한 기법이다.

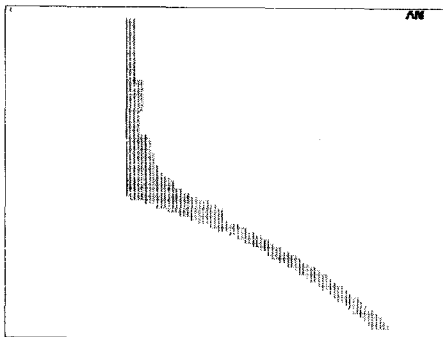
- (1) Querin, O.M., Young, V., Steven, G.P. and Xie, Y.M., 2000, "Computational Efficiency and Validation of Bi-directional Evolutionary Structural Optimisation," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 189, No. 2, pp. 559~573.
- (2) Ryu, C.H., Lee, Y.S., Choi, M.H. and Kim, Y.W., 2000, "Optimized Reinforcement Shape Design Around a Cutout Subject to Various Load Condition," *Proc. of the Fifth International Conference on Computational Structures Technology(CST2000)*, Computational Concrete Structures Technology, pp. 153~159.



(a) Radial compression

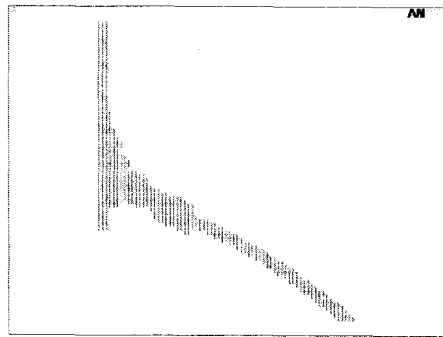


(b) Torque

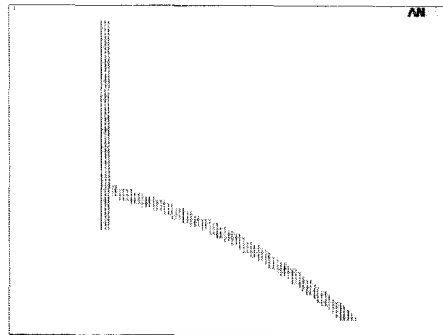


(c) Shear force

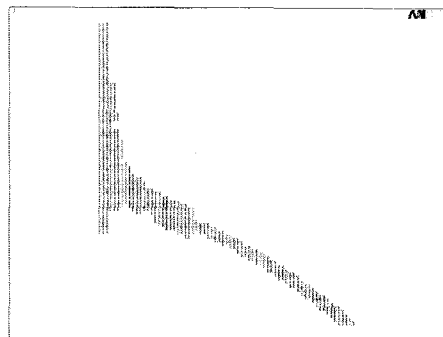
Fig. 6 Optimal topology on flush nozzle



(a) Radial compression



(b) Torque



(c) Shear force

Fig. 7 Optimal topology on protruding nozzle