

AutoCAD를 이용한 철근콘크리트 사각형 암거의 자동화 최적설계

Automatic Optimum Design of Reinforced Concrete Box Culvert Using AutoCAD

변근주 * 오 이상민** 송영철*** 이승훈****
Byun, Keun Joo Lee, Sang Min Song, Young Chul Lee, Seung Hoon

ABSTRACT

The objective of this study is to optimize the the section of RC box culvert and develop a CAD system for drawing. This paper consists of three parts. In the first part, the external load conditions are systematized by using the literatures and specifications. In the second one, the RC box culvert is optimized using the SUMT algorithm. Sizing variables, and steel ratio are taken as design variables, and a cost function as the objective function. The stress and side constraints are derived from the Korea Concrete Specifications for the ultimate strength design. Finally, a data base and CAD system is developed for the drawing of the optimized section of RC box culverts.

1. 서론

본 연구의 목적은 도로구조물, 수공구조물 및 전력구조물에서 중요한 위치를 차지하고 있는 철근콘크리트 사각형 암거의 자동화 최적설계 시스템을 개발하는데 있다.

철근콘크리트 사각형암거의 최적화 문제형성을 위하여 건설경비를 목적함수로 취하였으며, 극한강도 설계법에 의한 시방서의 제 기준을 제약조건식으로 유도하였다. 최적해의 산정을 위하여 내부벌칙함수를 이용한 무제약 최소화기법을 적용하였으며, 최적해의 수렴성을 증대시키기 위하여 황금분할법 및 가변계량법(variable metric method)를 적용하여 탐사길이 및 탐사방향을 결정하였다.

한편, 최적화 정보의 데이터베이스 및 도면제작을 위한 AutoCAD의 DXF파일 변환은 clipper compiler 및 dBASEIII PLUS 언어를 이용하였다.

본 연구에서 개발된 철근콘크리트 사각형암거의 자동화 최적설계 시스템은 설계변수의 입력만으로 철근콘크리트 사각형 암거의 최적단면의 산정은 물론 설계도면의 제작이 일괄적으로 실행되므로 실무에서 활용할 경우, 경제성의 제고와 설계도면의 고급화를 이룰 수 있을 것으로 사료된다.

2. 토압분포 및 활하중의 영향평가

사각형 암거에 작용하는 토압분포 및 활하중의 영향은 지반지지력, 피토고, 암거의 단면구성, 뒤

움푹의 내부마찰각, 점착력 및 단위중량, 지하수위의 높이, 다짐상태 그리고 시공방법 등에 따라서 변화하게된다. 외국의 경우, 현장실험 및 이론분석을 통하여 자국의 실정에 맞는 연직토압 및 활하중분포의 평가공식을 설계지침과 설계시방서에서 채택하여 실무에 적용하고 있으나, 나라마다 산정공식과 영향변수가 다소 상이하므로 본 연구에서는 이들 공식들을 상호분석하되 보다 합리적인 토압분포의 평가를 위한 기본자료로 활용하고자 한다.

2.1 연직토압의 평가

암거에 작용하는 토압분포는 연직토압과 수평토압으로 구분되나, 수평토압은 연직토압에 토압계수를 곱하여 평가되므로 연직토압의 엄밀한 평가가 설계하중의 산정에 큰 영향을 미치게된다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 적용되고 있는 Marston-Spangler이론식, Yaroshenko이론식, Frühling의 공식, Bierbaumer의 공식 및 일본건설성의 실험식등을 상호분석하여 자동화 최적설계에 적용할 설계하중의 산정에 합리적으로 반영하고자 한다.

그림 1.은 이들 공식들을 적용하여 외폭(Bc) x 외고(D)가 2m x 2m 인 사각형 암거에 발생하는 연직토압을 평가한 것으로 뒤채움흙의 부등침하면과 내부전단응력을 고려한 Marston-Spangler이론식이 가장 안전측이며, 피토고 5m 이상에서 연직토압이 일정한 것으로 가정한 Frühling의 공식은 상대적으로 설계하중을 적게 평가하는 것으로 나타났다. 분석결과로부터, 본 연구에서는 Marston-Spangler이론식과 유사한 결과를 주면서도 피토고/외폭의 비에 따른 토압증가계수를 적용하여 연직토압의 산정과정은 단순화 시킨 일본 건설성의 실험식을 적용하였다.

* 정희원 연세대학교 토목공학과 교수
** 정희원 연세대학교 토목공학과 박사과정
*** 정희원 한전기술연구원 토건부 연구과장
****정희원 연세대학교 토목공학과 연구조교

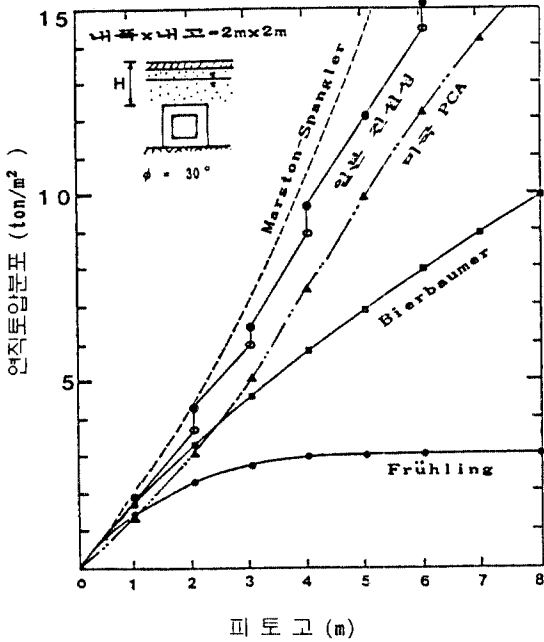


그림 1. 연직토압 산정식의 비교

2.2 활하중의 평가

뒤채움흙을 통하여 사각형암거의 상판에 전달되는 활하중의 영향을 엄밀히 평가하기 위해서는 뒤채움흙의 비선형 재료거동, 흙-구조물의 상호작용 및 구조물의 기하학적 특성을 고려하여야 하므로 매우 복잡한 계산과정을 거쳐야 한다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 뒤채움흙을 선형탄성 및 등방성 거동을 따르는 것으로 가정 한 후, 탄성해법을 적용하는 것이 일반적인 평가방법이다.

지금까지 적용되고 있는 탄성해법으로는 뒤채움흙을 반무한층의 등방탄성체로 가정한 Boussinesq이론, 지반을 선형탄성 거동으로 가정한 Westergaard이론, 뒤채움흙의 물성변화를 고려하여 반무한층의 다층탄성 구조로 이상화시킨 Burmister이론 및 Kögler의 근사 공식 등이 있다. 그림 2.는 이들 이론식과 건설부 강도로교 시방서, 미국 AASHTO시방서, 미국 포틀랜드시멘트협회 제안식 및 일본 도로공단의 설계기준을 비교분석한 것으로서 충격효과를 반영할 경우 미국 AASHTO 규정이 합리적인 것으로 평가되나, 산정과정의 복잡하므로 본 연구에서는 우리나라의 지중선설계지침에서 제시하고 있는 활하중 평가공식을 적용하였다.

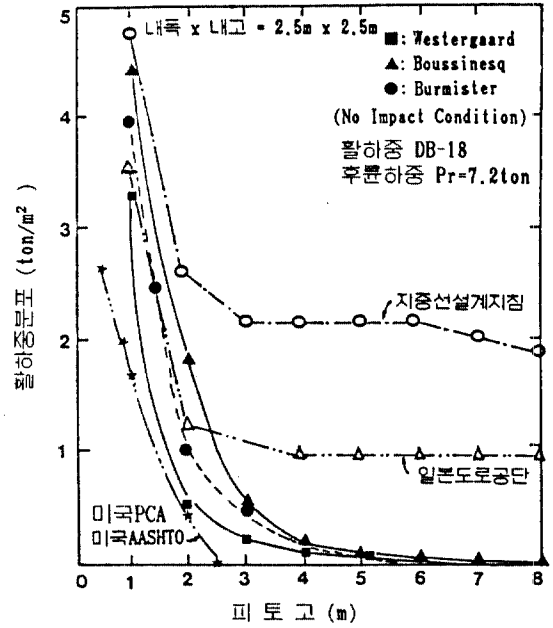


그림 2. 활하중 평가공식의 비교

3. 사각형 암거의 최적화 문제형성

3.1 목적함수의 유도

철근콘크리트 사각형암거의 최적설계를 위하여 콘크리트, 철근 및 거푸집의 단위길이당 건설경비를 목적함수로 유도하였다. 설계변수는 사각형암거의 부재두께 및 중앙부와 단부의 인장철근량을 선택하였다. 경비지수는 1989년 9월을 기준으로 하였으며, 그림 1.에 도시된 콘크리트 일원 사각형암거에 대하여, 목적함수를 설계변수의 함수로 유도하면 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 C(\bar{X}) &= C_c V_c + C_s V_s + C_f A_f \\
 &= C_c b [(X + 2 t_1)(Y + t_2 + t_3) - X Y] \\
 &\quad + C_s [A_s1 L_1 + 2 A_s2 L_2 + A_s3 L_3 + A_s4 L_4 \\
 &\quad + A_s5 L_5 + 2 A_s6 L_6 + A_s7 L_7] \\
 &\quad + C_f b [X + 2 (2 Y + t_2 + t_3)] \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서, $C(\bar{X})$: 사각형 암거의 단위길이당 건설경비

C_c : 단위체적당 콘크리트의 경비

C_s : 단위체적당 철근의 경비

C_f : 단위면적당 거푸집의 경비

V_c : 콘크리트의 체적

V_s : 철근의 체적

A_f : 거푸집의 면적

b : 단위길이

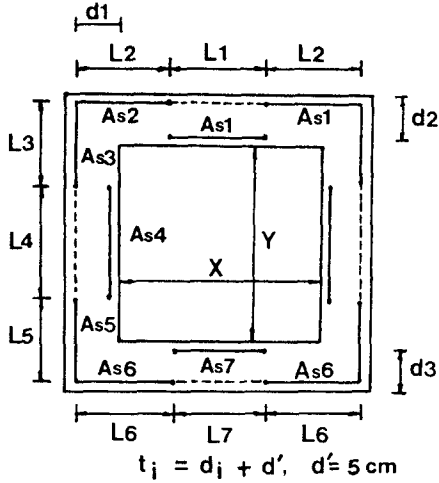


그림 3. 일연 사각형암거의 단면

3.2 설계제약조건식의 유도

단면설계이론으로는 극한강도설계법을 적용하였으며, 건설부 콘크리트 표준시방서의 제기준을 적용하여 상판, 저판 및 측벽의 중앙부와 단부에 대한 휨응력, 최소철근비, 최대철근비 및 최소두께규정을 설계제약조건식으로 유도하였다. 따라서 상판, 저판 및 측벽에 대하여 총 24개의 제약조건식이 구성되나, 각 부재별로 형태가 유사하므로 본 논문에서는 상판의 제약조건식 7개만을 제시하기로 한다.

3.2.1 휨응력제약

$$G1 = \phi \text{ As1 } \sigma_y \left(d1 - \frac{\text{As1 } \sigma_y}{1.7 \sigma_{ck} b} \right) - M_{ui} \geq 0 \quad (2)$$

$$G2 = \phi \text{ As2 } \sigma_y \left(d1 - \frac{\text{As2 } \sigma_y}{1.7 \sigma_{ck} b} \right) - M_{ui} \geq 0 \quad (3)$$

여기서, $\phi = 0.85$
 $M_{ui} = 1.2 M_{di} + 1.8 M_{li}$

3.2.2 최소철근비제약

$$G3 = \frac{\text{As1}}{b d1} - \frac{14}{\sigma_y} \geq 0 \quad (4)$$

$$G3 = \frac{\text{As2}}{b d1} - \frac{14}{\sigma_y} \geq 0 \quad (5)$$

3.2.3 최대철근비 제약

$$G5 = \frac{3901.5 \text{ kI } \sigma_{ck}}{\sigma_y (6120 + \sigma_y)} - \frac{\text{As1}}{b d1} \geq 0 \quad (6)$$

$$G6 = \frac{3901.5 \text{ kI } \sigma_{ck}}{\sigma_y (6120 + \sigma_y)} - \frac{\text{As2}}{b d1} \geq 0 \quad (7)$$

3.2.4 최소두께 제약

$$G7 = d1 - d_{min} \geq 0, \quad d_{min} = 15\text{cm} \quad (8)$$

4. 무제약최소화기법에 의한 최적단면의 산정

4.1 내부벌칙함수를 이용한 의사목적함수의 유도

제약조건식을 가지고 있는 최적화문제에 무제약최소화기법을 적용하기 위해서는 벌칙매개변수 및 벌칙함수를 이용하여 제약조건식을 목적함수에 포함시켜야 한다.

본 연구에서는 설계변수의 탐사가 항상 설계가능영역 내에서 이루어져 공학적인 설계에 유용한 내부벌칙함수법을 이용하여 의사목적함수(pseudo-objective function)를 형성하였다. 또한 최적화 과정에서 설계변수의 값이 설계불가능영역으로 미소구간 이동할 경우, 제약조건식의 경계점에서 벌칙함수가 불연속이 되므로 이러한 가능성을 배제하기 위하여 벌칙함수를 제약조건식으로부터 미소구간 ϵ 만큼 떨어진 위치에서 설계불가능영역 쪽으로 전개시킨 2차전개벌칙함수를 사용하였다. 내부벌칙함수를 이용한 의사목적함수는 식(9)와 같다.

$$\Phi(\bar{X}, r_p) = C(\bar{X}) + \Gamma_p P(\bar{X}) \quad (9)$$

- $G_j(\bar{X}) \leq \epsilon$ 인 경우 : $P(\bar{X}) = \sum_{j=1}^k \frac{-1}{G_j(\bar{X})}$
- $G_j(\bar{X}) > \epsilon$ 인 경우 :

$$P(\bar{X}) = \sum_{j=1}^k \frac{-1}{\epsilon} \left\{ \left[\frac{G_j(\bar{X})}{\epsilon} \right]^2 - 3 \left[\frac{G_j(\bar{X})}{\epsilon} \right] + 3 \right\} \quad (11)$$

여기서, Φ : 의사목적함수
 $C(\bar{X})$: 목적함수
 Γ_p : 벌칙매개변수
 $P(\bar{X})$: 2차전개벌칙함수
 k : 제약조건식의 수
 $G_j(\bar{X})$: 제약조건식
 ϵ : 내부벌칙함수가 외부벌칙함수로 바뀌는 경계점 ($\epsilon < 0$)

4.2 일방향탐사에 의한 최적해의 산정

본 연구에서 유도한 의사목적함수는 내부벌칙함수에 의하여 무제약최소화문제로 변환되었기 때문에 일방향탐사기법에 의한 최적해의 산정이 가능하다. 일

방향탐사기법은 식(12)와 같이 최적화과정중 i 번째 설계점의 설계변수 \bar{X}^i 로부터 탐사길이 및 탐사방향을 결정하여 축차적으로 $i+1$ 번째 설계점의 \bar{X}^{i+1} 로 수정하면서 국부해를 구하는 방법이다.

$$\bar{X}^{i+1} = \bar{X}^i + \alpha \bar{S}^i \quad (12)$$

여기서, \bar{X}^i : i 번째 단계의 설계점
 \bar{X}^{i+1} : $i+1$ 번째 단계의 설계점
 α : 탐사길이
 \bar{S}^i : i 번째 단계의 탐사방향

4.3 가변계량법에 의한 탐사방향의 결정

무제약최소화문제의 탐사방향을 결정하는 방법 중 1차도함수를 이용하는 방법에는 급강하법, 공액방향법 및 가변계량법등이 있으나, 본 연구에서는 Hessian matrix의 역행렬을 최적해의 산정과정에 적절히 반영시키므로서 수렴성을 개선시킨 가변계량법을 적용하였다. 가변계량법에 의한 탐사방향의 결정과정은 식(13)에 제시된 바와 같으며, 각 반복과정에서 Hessian matrix의 수정은 Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno(BFGS)의 재안식을 이용하였다.

$$\begin{aligned} \bar{S}^i &= -\bar{H}^{-1} \nabla C(\bar{X}^i) \\ \bar{H}^{i+1} &= \bar{H}^i + \bar{D}^i \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, \bar{S}^i : 탐사방향벡터
 \bar{H}^i : Hessian matrix(수정벡터)
 $\nabla C(\bar{X}^i)$: 설계변수의 1차도함수
 \bar{D}^i : \bar{H} 행렬에 대한 대칭수정행렬

4.4 황금분할법에 의한 탐사길이의 결정

황금분할법은 황금분할비 $\delta = 0.38197$ 를 이용하여 탐사구간의 상한치와 하한치를 결정하는 방법으로 산정과정은 식(14)에 제시된 바와 같다.

$$\begin{aligned} \alpha^i &= (1 - \delta) \alpha^L + \alpha^U \\ \alpha^j &= \delta \alpha^L + (1 + \delta) \alpha^U \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, α^L, α^U : 탐사구간의 상한치 및 하한치
 α^i, α^j : 탐사영역내의 내부점 ($\alpha^i < \alpha^j$)
 δ : 황금분할비 ($\delta = 0.38197$)

4.5 최적설계과정의 흐름도

무제약최소화기법에 의한 철근콘크리트 일원 사각형암거의 최적설계과정을 흐름도로 도시하면 그림 4.와 같다.

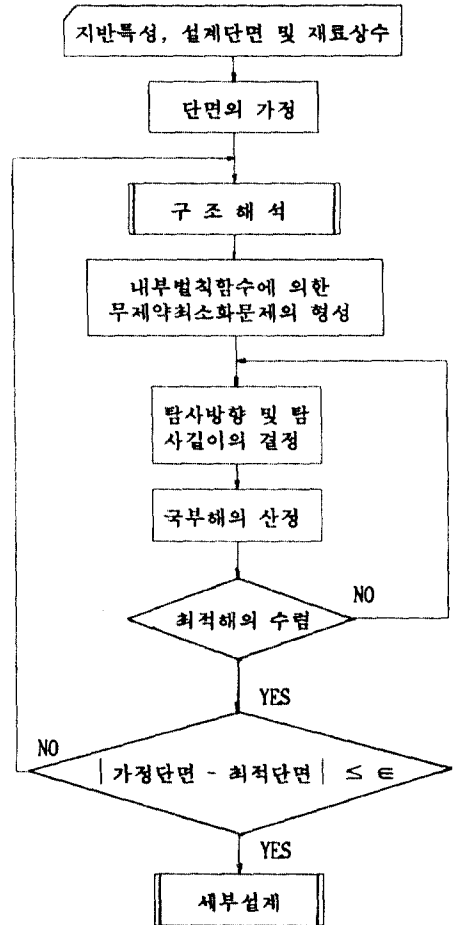


그림 4. 최적설계과정의 흐름도

4.6 최적화경향의 분석

본 연구에서 개발한 최적화 알고리즘의 수렴성을 검증하기 위하여 내폭 x 내고가 2.5m x 2.5m인 일원 사각형 암거의 최적해 수렴경향을 분석한 결과, 그림 5.에 도시된 바와 같이 초기치에 관계없이 3-5 회의 반복만으로 최적해에 도달하였기 때문에 매우 효율적인 것으로 평가된다.

한편, 동일한 설계조건에 대하여 본 연구에서 산정한 최적단면과 재래적인 설계법에 의한 평형단면 및 건설부 암거표준도의 설계단면을 비교한 결과는 그림 6. 및 그림 7.과 같다. 분석결과에 의하면 피토키가 작은 경우는 시방서에 규정된 최소두께 및 최소철근비의 제약을 받으므로 설계경비가 유사하나, 피토키가 5m 이상이 될 경우, 최적설계를 실시

하면 재래설계법에 비하여 건설경비를 크게 감소시킬 수 있는 것으로 평가된다.

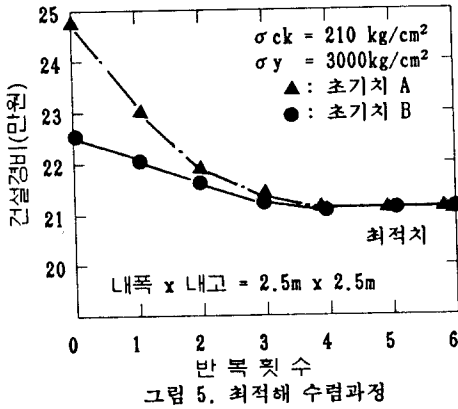


그림 5. 최적해 수렴과정

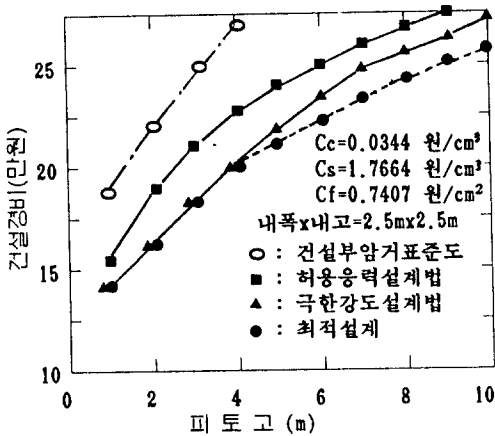


그림 6. 일연 사각형암거의 최적화 경향

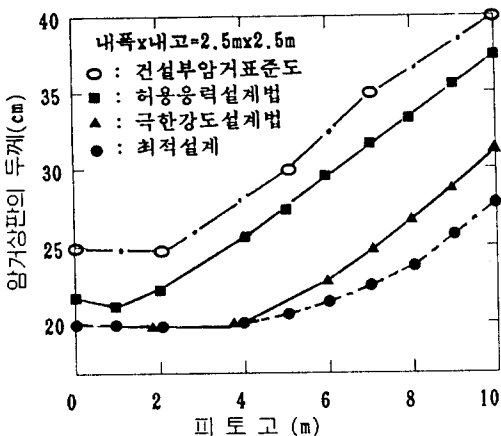


그림 7. 일연 사각형암거의 상판두께 변화

5. 자동화 최적설계 시스템의 개발

5.1 CLIPPER에 의한 설계자료의 데이터 베이스

본 연구에서 자동화 최적설계 시스템을 개발하기 위하여 설계정보의 데이터 베이스에 도입한 clipper compiler는 dBASE III PLUS언어의 각종 명령문으로 구성된 소프트웨어로서 다른 소프트웨어의 도움 없이도 응용프로그램을 작성하고 컴파일시킬 수 있도록 기능이 보강된 시스템이다.

Clipper로 컴파일된 프로그램은 각 행마다 여러 줄을 검정하고 기계어로 변환시키지 않고도 운영체제 내에서 직접 프로그램을 실행시킬 수 있을 뿐만 아니라, 컴파일 및 링크과정에서 원시코드가 기계어 코드로 변환되기때문에 컴파일 중에 전 원시코드에서 발생한 에러의 검정 및 수정이 가능하므로 매우 효율적이다.

따라서 본 연구에서는 clipper compiler를 이용하여 사각형암거의 설계정보 입력, 최적설계프로그램의 실행, 각종 최적화 설계정보의 데이터 베이스 구성, 도면작성을 위한 DXF.파일의 생성 및 AutoCAD프로그램의 실행등이 일괄적으로 실행될 수 있도록 주 메뉴와 세부메뉴로 구분하여 자동화 시스템을 구성하였다.

5.2 dBASE III PLUS를 이용한 DXF파일의 생성

일반적으로 CAD시스템을 이용한 도면생산과정은 실무자가 별도의 구조설계과정을 수행한 후, 정리된 설계자료를 컴퓨터에 대화식으로 입력시키는 대화식 작업(interactive job)과 clipper compiler에서 생성된 데이터 베이스를 이용하여 구조설계과정과 도면생산을 일괄 실행시키는 일괄작업(batch job)으로 구분된다.

일괄작업에 의한 자동화 시스템을 개발하기 위해서는 설계프로그램의 출력문을 도면제작을 위한 입력파일로 변환시켜야 하므로, 본 연구에서는 FORTRAN언어로 개발된 일연 사각형암거의 최적설계프로그램의 설계정보를 clipper compiler 내에서 DBF파일로 저장한 후, 다시 dBASE III Plus언어를 이용하여 AutoCAD의 입력파일인 DXF.파일로 자동변환 되도록 하였다.

5.3 자동화 최적설계 시스템의 실행과정

본 연구에서 개발한 철근콘크리트 일연 사각형암거의 자동화 최적설계 시스템의 실행과정을 체계적으로 도시하면 그림 8.과 같으며, A3크기의 X-Y plotter로 제작된 세부설계도면은 그림 9.에 제시된 바와 같다.

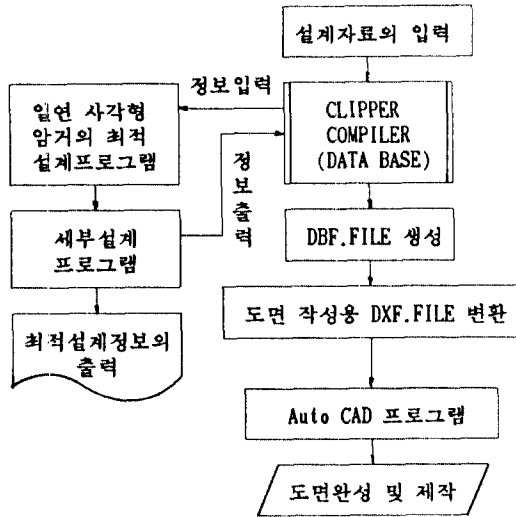


그림 8. 사각형 압거의 자동화 최적설계 시스템

6. 결론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 개발한 철근콘크리트 일연 사각형 압거의 자동화 최적설계 시스템은 설계조건만 입력시키면 최적단면의 산정과 세부설계도면의 제작이 일괄적으로 실행되므로 매우 효율적이다.

- (2) 최적단면의 산정에 적용한 최적화 알고리즘은 내부법적함수를 이용한 무제약최소화기법으로서, 탐사방향의 결정을 위하여 1차도함수법인 가변계량법을, 탐사길이의 선정에는 황금분할법을 적용시키므로서 수렴성 및 효율성을 증대시켰다.
- (3) 본 연구에서 개발한 자동화 최적설계 시스템은 최적단면의 산정, 설계도면의 제작기능은 물론 설계정보의 데이터 베이스 기능이 있으므로, 실무에서 활용할 경우, 설계도면의 재료량 산출 및 설계정보의 효율적인 관리가 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Yamada, Y., "Optimization of Structural Systems -Theory and Application", JSCE, 1988, p.286.
2. Levy, R., and Lev, O.E., "Recent Developments in Structural Optimization", Jr. of Structural Engineering, Vol.113, No.9, Sep.1987, pp.1939-1962.
3. Vanderplaats, G. N., "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design", McGraw-Hill Book Company, 1984, pp.121-136.
4. Lev, O.E.(ed), "Structural Optimization-Recent Developments and Application", State-of-the-Art Report by an ad-hoc Committee, Special ASCE Publication, 1981, pp.7-20.
5. Marston, A., "The Theory of External Loads on Closed Conduits in the Light of the Latest Experiments", Bul.96, Iowa Engineering Experiments Station, Ames, Iowa, 1930.
6. Mills, D. and Brotton, D.M., "Computer-aided Detailing of Reinforced Concrete Structures", The Structural Engineer, Vol.57, NO.1, 1979.

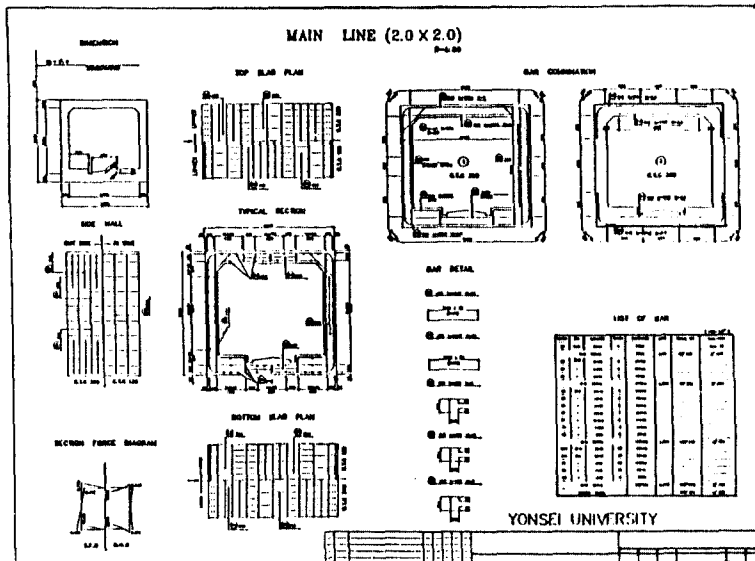


그림 9. 일연 사각형 압거의 세부설계도면 예