

화학플랜트 고온고압부 설계 효율화를 위한 일관시스템 구축

정 동 관

삼성중공업 기전연구소
(1998년 11월 11일 접수, 1998년 11월 27일 채택)

Development of Integrated Design System for High Temperature, High Pressure Parts for Chemical Plants

Dong Gwan Jeong

Research Institute of Machinery & Electrotechnology(SHI)
(Received 2 June 1998; Accepted 8 October 1998)

요 약

중화학 플랜트의 고온고압 요소인 증기 발생기(steam generator)의 드럼, 헤더 및 헤더 스텀브 설계에 응력해석에서부터 도면자동작도, 제작용 서류 자동생성에 이르기까지의 제반 설계과정을 체계적으로 연결시킨 설계정보 통합 관리로 단순 설계오류를 줄이고, 또한 설계 변경에 대해 신속한 재설계가 가능한 효율적인 설계를 도모하기 위하여 “피로수명을 고려한 헤더스텀브 형상설계 모듈”, “TRD301을 기초로한 후육내압부 운전조건(기동/정지 조건) 및 수명평가 모듈”, “헤더 및 드럼부 자동작도 모듈”을 개발하였다. 이에 따라 형상설계 모듈을 이용하여 설계된 스텀브 형상을 토대로 수명평가 모듈로 수명을 평가한 후 상세설계 도면 및 관련 서류의 자동작도로 이어지는 일관된 종합설계 시스템을 구축하였다.

Abstract - In order to increase design efficiency, it is required to design steam boiler pressure parts systematically considering daily start-stop operation and load variation. The objective of this research is to develop an integrated system for increasing design efficiency of boiler pressure parts. The developed system consists of three program modules: ① flexibility design module for the header stub considering fatigue life, ② fatigue limit calculation and life evaluation module for the thick-walled boiler pressure part under cyclic operation using TRD301 code, ③ drawing automation module for the header and drum producing design drawings, welding data and bill of materials.

Key words : Fatigue Life, Flexibility Design, Drawing Automation, Steam Generator, Pressure Vessel, Integrated Design System

1. 서 론

60년대에 공업화를 시작하여 많은 중화학 플랜트가 건설된 이래 증기보일러(steam generator)의 효율증대를 위한 고온, 고압화 추세와 안전의 중요성 등 설계조건이 가혹해지고 고신뢰성 설계가 요구되고 있다. 보일러의 고온 고압부는 헤더 스텀브, 보일러 튜브 등의 박육부(thin part)와 헤더, 드럼 등의 후육부(thick part)로 대별되며 박육부는 강도 및 유연성 확보

여부가, 후육부는 열응력에 의한 균열발생 및 전파가 설비의 수명을 좌우하게 된다. 헤더 스텀브로 대표되는 박육부는 구조나 배치를 변경하여 적당한 유연성을 확보함으로써 응력을 감소시킬 수 있으며 헤더와 같은 후육부는 운전조건을 변경하여 응력저감을 도모할 수 있다. 이러한 측면에서 볼 때 보일러의 과열기 및 재열기 등의 헤더 스텀브가 불안정한 반복피로에 충만한 내구성을 갖도록 적절한 유연성을 갖는 형상으로 설계되어야 한다¹⁾.

이를 위하여 본 연구에서는 보일러의 성능 및 운전조건에 따른 수명을 고려한 안전하고 경제적인 내압부(헤더 및 드럼부)의 강도설계를 효과적으로 수행하고자 “피로수명을 고려한 헤더스터브 형상설계 모듈”을 개발하였다. 또한, 보일러의 기동과 정지시 헤더나 드럼과 같은 후속내압부의 튜브구멍의 내부 모서리부는 일반적인 내부 유체온도 변화에도 항복강도를 초과하는 큰 국부 열응력이 발생되기 쉬우므로 균열발생의 위험이 높다. 이러한 균열의 발생·진전으로 파손사고가 발생할 경우 인명피해를 초래할 위험과 내부 균열의 보수가 곤란한 특징이 있으므로 적절한 설계 및 수명관리가 중요시 되어야 한다^{2,3)}. 기동/사용/정지를 반복하는 보일러의 운전조건 중 특히 기동시 부하를 증가시키는 원인으로 과도한 내부유체 승온속도가 문제시 되므로 보일러 제작사에 의해 제시되는 승온속도를 사용자가 준수하여 기동에 따른 열응력 등의 이상부하를 최소화하여야 한다. 독일의 보일러 설계코드인 TRD301 Annex 1⁴⁾을 기초로 주어진 형상조건에서 요구되는 기동/정지 횟수를 충족시킬 수 있는 최적의 운전조건(허용되는 급속 승온속도 및 허용 온도차)을 찾아 수명 및 신뢰성이 확보된 설계가 될 수 있도록 하기 위해 실제 혹은 가상 운전조건에서의 수명 소비 정도를 평가할 수 있는 “TRD301을 기초로한 후속내압부 운전조건(기동/정지 조건) 및 수명평가 모듈”을 개발하였다. 또한, 설계변경 등의 외부 환경변화에 신속히 대처하며 설계시 발생될 수 있는 오류를 최소화하여 제작기간을 단축하고 표준설계 절차에 의한 설계공수(man hour)를 단축하고자 “헤더 및 드럼부 자동작도 모듈”을 개발하였다. 형상설계 모듈을 이용하여 설계된 스텐드 형상을 토대로 수명평가 모듈로 신뢰성을 확보한 후 상세설계 도면 및 관련 서류의 자동작도로 이어지는 일관된 시스템을 구축하고 이 시스템을 드럼, 헤더 및 헤더 스텐드 설계에 적용하여 그 효과를 검토하였다.

2. 일관시스템 구축

반복적인 기동/정지 운전으로 보일러의 구조적 핵심 부분인 헤더 및 드럼부에 발생하는 반복적 열응력을 고려한 피로수명 설계가 될 수 있도록 하고, 기본설계에서 상세설계까지의 설계 데이터를 일원화하여 신속 정확한 데이터의 흐름으로 설계 정도를 높여 플랜트의 성능 향상을 도모하고 설계기간 및 제작기간 단축을 위하여 Fig. 1의 흐름도와 같이 3개의 모듈로 일관 시스템을 구축하여 Fig. 2의 일례와 같이 위치

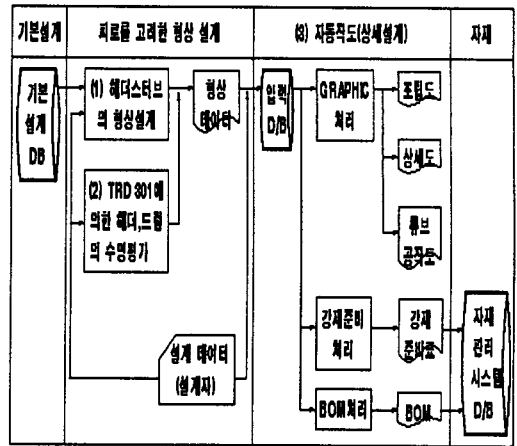


Fig. 1. Integrated design system flow chart

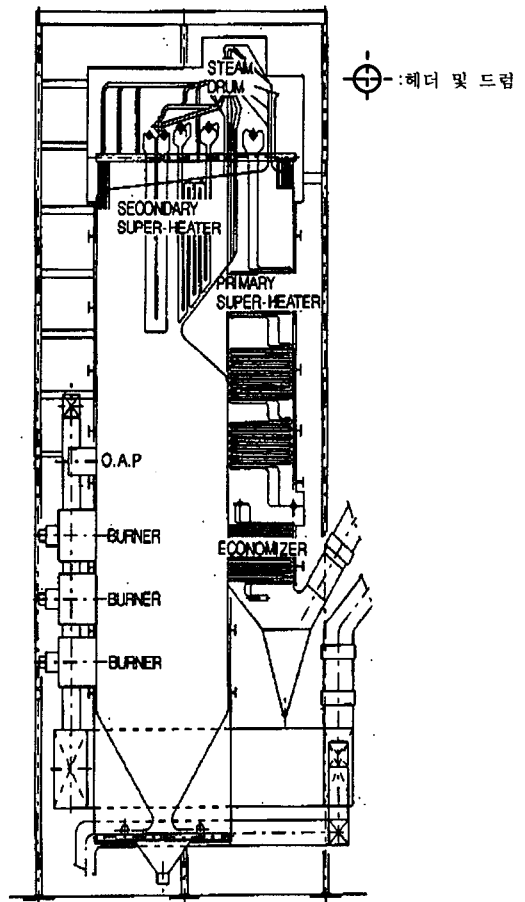


Fig. 2. Header arrangement

한 각종 드럼, 헤더 및 헤더 스템브의 설계에 적용하였다. 3개 모듈의 상세 내용과 개발된 시스템의 주요 특징은 다음과 같다.

- D/B 데이터의 공유를 통한 기본/상세 설계
- TRD301, ASME B31.1 등의 설계 코드 및 설계 기준에 의거한 설계 기능
- 다수의 설계 경험을 토대로한 데이터 베이스 구축 및 활용
- 패턴도(기존 설계 도면) 활용에 의한 최소의 작도 데이터 입력
- 각종 강도계산 및 설계 프로그램과 연계된 상세설계 도면 및 관련서류의 자동작도

2.1. 피로수명을 고려한 헤더 스템브 형상설계 모듈

보일러의 과열기 및 재열기 등의 헤더 스템브가 불안정한 반복피로에 충분한 내구성을 가지기 위하여 Fig. 3에서와 같이 노벽과 헤더간의 온도차, 동일 판넬내의 스템브간 온도차에 의해 발생하는 각 부분에서의 열변형차를 흡수할 수 있도록 적절한 유연성을 가지게 함으로써 열응력을 최소화하는 형상설계 방법을 확립하고 프로그램화하였다. 형상설계 전산 프로그램은 Fig. 4의 프로그램 주 창에서와 같이 「노벽으로부터의 헤더 위치 결정」, 「스템브의 형상설계」, 「상세 해석을 위한 상용 S/W의 입력데이터 생성 및 해석 결과 데이터 평가」의 3단계로 구성되며 각 단계별 세부기능은 다음과 같다.

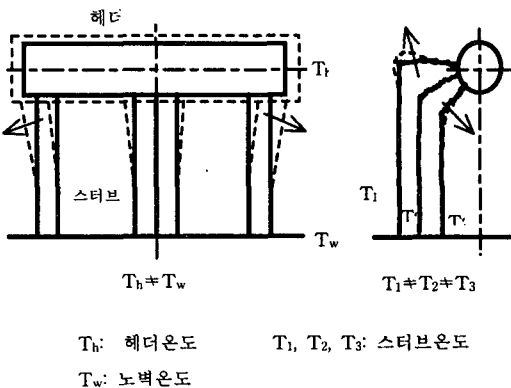


Fig. 3. Temperature difference between header and wall and those between the stubs

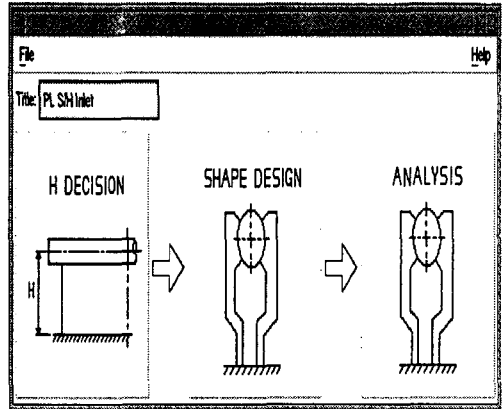
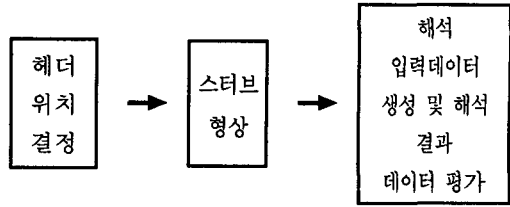


Fig. 4. Main screen of flexibility design module

1 단계 : 헤더 위치 결정

Fig. 5의 헤더 위치를 결정하기 위한 창에서 보는 바와 같이 헤더와 튜브의 재질, 예상 기동/정지 횟수, 응력 집중계수, 상온 및 운전온도에서의 재료허용응력 등을 입력한다. 헤더와 노벽의 온도차에 의해서 발생하는 응력을 응력집중계수를 고려한 간이 계산식으로 구하여 헤더와 노벽간의 적절한 거리를 계산한다. 이미 헤더의 위치가 결정되어 있는 경우에는 간이계산식에 의해 대략적인 허용응력에 대한 실제 응력비를 얻을 수 있다.

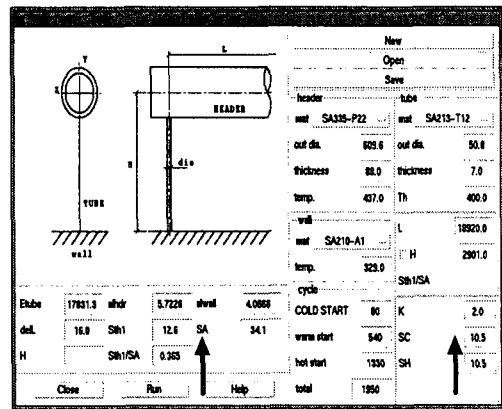


Fig. 5. Screen for header position determination

2 단계 : 스템브 형상 설계

스템브 형상 설계창(Fig. 6)에서와 같이 GUI(graphic user interface)를 이용하여 1단계에서 결정된 위치의 헤더로부터 스템브의 형상을 설계하며 기존의 질적 도면을 활용 수정하여 설계할 수도 있다. 또한 튜브의 재질 및 치수 데이터 등 3단계의 해석에 필요한 데이터를 입력한다.

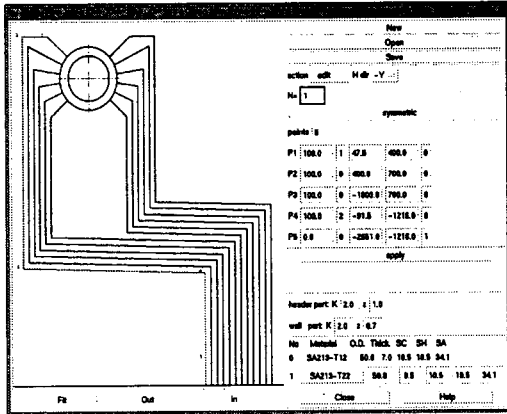


Fig. 6. Input form for stub shape design

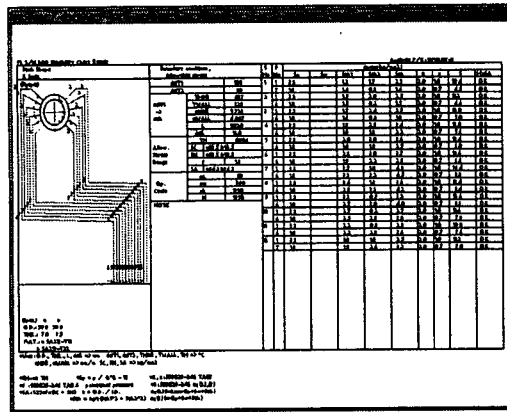


Fig. 7. Result report

3 단계 : 입력데이터 생성 및 해석 결과 데이터 평가

1,2단계에서 헤더의 위치 및 스템브의 형상이 결정되면 배관해석용 프로그램인 SIMFLEX-II⁵⁾를 사용하여 상세 응력해석을 수행한다. 이 단계에서는 결정된 형상으로부터 상용 해석 프로그램의 입력 데이터를 자동 생성하는 부분(Pre-processor)과 해석 프로그램의 결과 데이터를 읽어들이 처리하는 부분(Post-processor)으로 나누었다. 입력된 예상 기동/정지 횟수, 상온 및 운전온도에서의 재료 허용응력으로 부터 피로

허용응력을 산출하고 해석결과의 비교로 유연성 만족여부를 Fig. 7과 같은 창에서 보여준다. 이때 자중, 헤더와 노벽과의 온도차 및 동일 패널 내의 스템브간 온도차에 의해 계산된 합성응력이 허용응력보다 커 만족되지 못하는 것으로 판정되면 설계 형상이 허용응력을 흡수할 수 있을 정도로 충분한 유연성을 갖고 있지 않기 때문으로 다시 1단계로 돌아가 주위와의 간섭을 고려하여 최대한 유연한 구조로 재설계하는 전과정을 반복하게 된다.

2.2. TRD301을 기초로한 후속내압부 운전 조건 및 수명 평가 모듈

보일러의 기동과 정지시 드림, 헤더 등의 후속 내압부는 내부 유체 온도변화에 따라 Fig. 8에서와 같이 내면과 중심부간의 온도차(ΔT)가 발생하게 되고 이에 따른 열응력은 노즐이나 Fig. 9에서와 같은 튜브 내부구멍 내면 모서리 부분에 피로균열을 발생시키는 원인이 되므로, 급속 기동이나 정지, 급격한 부하변동 등은 건전한 운전을 통한 플랜트의 장수명화에 제한요소가 된다.

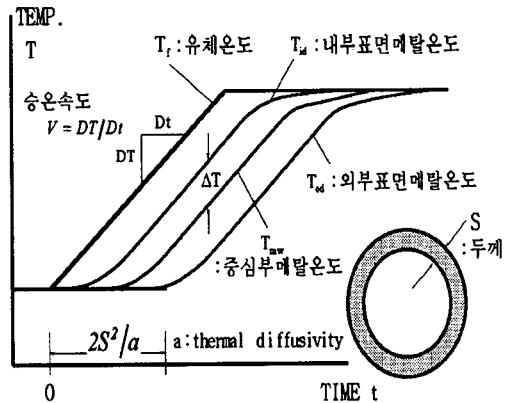


Fig. 8. Metal temperature change according to internal fluid temperature change

또한, 내면 모서리 부분의 균열은 파손사고에 의한 인명피해의 위험과 균열 발생시에 보수가 곤란한 특징이 있으므로 적절한 설계 및 수명판리가 수행되어야 한다. 이를 위하여 예상 운전 에 의한 열응력이 설계조건에 만족되도록 주어진 형상에서의 운전조건(허용 급속 승온속도, 온도차)을 결정하고, 실제 혹은 가상 운전조건에서의 수명소비 정도를 평가할 수 있는 모듈을 독일 보일러 설계코드인 TRD301 Annex 1을 기초로 하여 개발하였다. 이를 이용하여 계산된

운전조건이 기동시 요구되는 승은 속도 등을 만족하지 못하거나 충분한 피로수명을 확보하고 있지 못하면 헤더의 두께나 재질을 변경하여 재설계하게 된다. 본 모듈은 피로 한계 계산 모듈과 수명평가 모듈로 구성되며 각각의 내용은 다음과 같다.

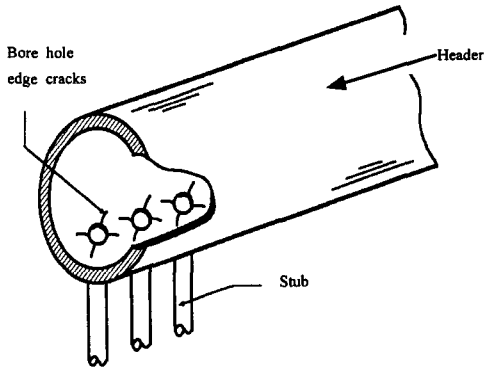


Fig. 9. Position of Bore hole edge crack

피로한계 계산 모듈 : 피로한계 계산 모듈은 형상정보와 예상 운전 온도, 압력의 최대 최소 값이 입력되면 Fig. 10에 보인 예와 같이 예상 운전 사이클수를 만족시킬 수 있는 허용 금속온도차 및 승온속도 등의 운전의 한계값을 계산한다.

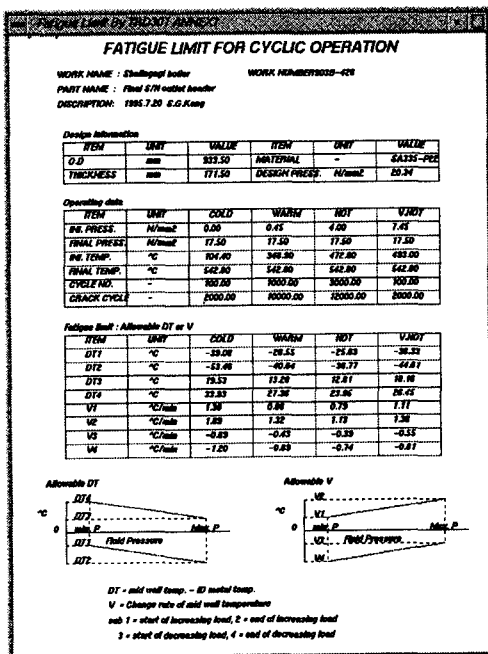


Fig. 10. Result of fatigue limit calculation

수명평가 모듈 : 수명평가 모듈은 고온, 고압 및 기동/정지에 기인하는 손상의 정량적 분석이 가능하도록 형상정보와 유체의 온도, 압력, 유량 등의 상세운전 데이터가 입력되면 피로와 크리프 손상에 의한 수명소비율을 계산한다. Fig. 11에 보인 바와 같이 유한차분법에 의해 금속온도 분포와 이에 따른 열응력을 계산하여 온도변화에 대한 수명과 내부 유체 온도 변화속도와 변화폭에 따른 등수명 선도(Fig. 12)를 계산한다. Fig. 11과 Fig. 12에 보인 예는 헤더의 외경, 두께, 내부구멍직경이 각각 933.50mm, 171.50mm, 57.20 mm이고 재질이 SA335-P22인 최종 과열기 출구헤더의 튜브구멍 내면 모서리 부분을 해석한 결과이다. 기동시 내부와 중심부간의 금속 온도차를 최대 47°C로 발생시키는 유체온도 변화폭 111°C, 유체온도 변화속도 3.7°C/분의 변화에 따라 응력은 220MPa의 압축 응력에서 290MPa의 인장응력으로 변화되었으며 이 때 수명은 1860 사이클로 계산되었다.

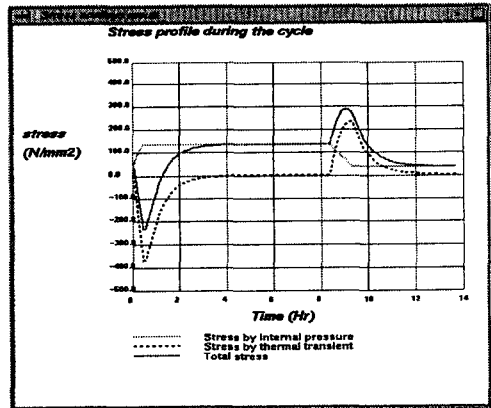


Fig. 11. Result of stress analysis

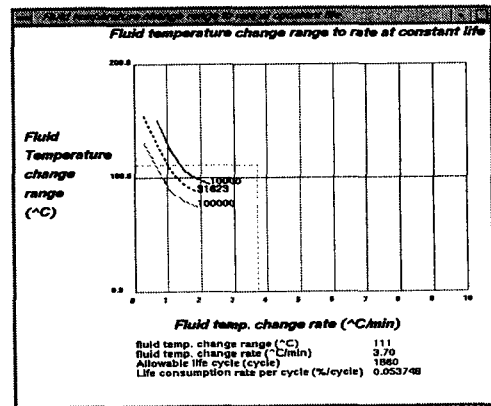


Fig. 12. Fluid temperature change range to rate at constant life

2.3. 헤더 및 드럼부 자동작도 모듈

자동작도 모듈에서는 앞에 설명한 형상설계 모듈(2.1항)과 수명평가 모듈(2.2항)로부터 결정된 드럼, 헤더, 스테르브의 형상 데이터를 입력받는다. 입력된 형상 데이터와 D/B화된 기타설계 데이터나 배치 데이터 등 기본설계 데이터를 최대한 활용하고 Fig. 13에 보인 예와 같이 간단한 대화 형식의 입력으로 헤더부와 드럼부의 상세 제반 데이터를 산출한다. 이 데이터를 이용하여 제작에 필요한 재료를 결정하고 강제준비표를 처리하여 재료준비 시스템에 데이터를 전송하게 된다. 또한, 그래픽 데이터로 변환하여 제작시의 조립도(Fig. 14), 부품 상세도 및 튜브 공작도와 같은 설계 도면, 용접 데이터, 드럼 굽힘 절차서, 재료 구매서(bill of materials) 등을 작성하여 제작에 관련한 필요 정보를 제공하도록 개발하였다. 개발된 시스템을 실제 설계에 적용한 결과 증기 발생기의 용량에 따라 다소 차이는 있으나 기본설계에서 제작 데이터까지의 원활한 흐름과 설계자의 오류감소, 도면 수정의 용이함 등으로 설비 한기당 평균 설계공수가 2200hr(man hour) 정도 절감되었다.

3. 결 론

중화학 플랜트의 고온 고압 요소인 증기 발생기의 드럼, 헤더 및 헤더 스테르브 설계에 응력해석에서부터 도면자동작도, 제작용 사양 자동생성에 이르기까지의 제반 절차 즉, 기본설계, 상세설계, 생산설계 업무를 체계적으로 연결시켜 효율적인 설계를 도모하기 위한 일관시스템을 개발 구축하였다. 개발된 시스템을 설계에 적용함으로써 다음과 같은 효과를 얻을 수 있었다.

- 설비의 수명을 고려하여 운전 조건에 맞는 유연한 구조의 효율적 설계가 가능하였다.
- 설계 정보 통합 관리로 기본설계에서 상세설계까지의 설계 데이터를 일원화하여 단순 설계 오류를 줄일 수 있고, 설계변경에 대한 신속한 대응 등으로 설계기간 및 제작기간 단축이 가능하였다.
- 압력, 온도 조건이 다양한 여러 종류의 증기 발생기에 대한 사전 간이 설계를 통한 차이점 검토가 용이하였다.

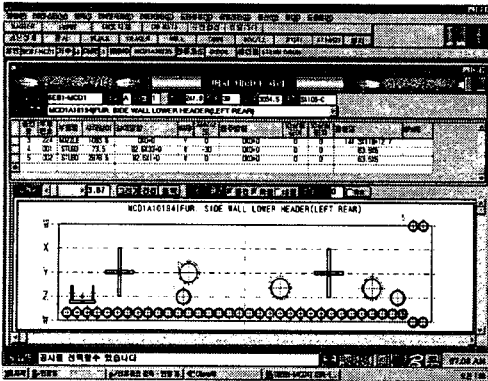


Fig. 13. GUI for drawing automation

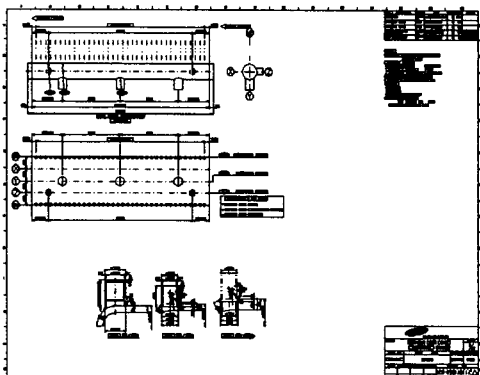


Fig. 14. Assembly drawing for header

참 고 문 헌

1. Goragno W.P., "Steam generations for cycling service", American Power Conference, Chicago, Illinois, April pp.20-22(1978).
2. Fitzgerald F.D., "Simplified calculation procedure for monitoring boiler start-up and cycling operations", Foster Wheeler International Engineering Conference(1988).
3. Chen K.L. et al, "Creep-fatigue monitoring system for header ligaments of fossil power plants", Fracture Mechanics, PVP-Vol. 260, pp. 83~91(1993).
4. Technical Rules for Steam Boiler (TRD), "Cylindrical shells under internal pressure", TRD301 ANNEX 1 UDC 621.181.02.001.2:539.4, April(1979).
5. SIMPLEX-II Piping stress analysis program, Rev 4.2, PENG Engineering, April(1991).