

2001 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 한국표준형 원전용 신속개폐형 차단플랜지 개발

### Development of Quick Opening Blind Flange for KSNP

김범식, 황정기, 장상균, 맹철수, 김민규

한국전력기술(주)  
305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

김승태, 박기성

한전기공(주)  
463-480 경기도 성남시 분당구 금곡동 196번지

#### 요 약

차단플랜지는 핵연료 이송관의 원자로 건물쪽 끝단에 부착되어 있어서 원자로 정상운전중에는 핵연료 이송관을 밀폐하여 원자로 건물의 압력경계를 이루며, 계획예방정비기간중에는 제거되어 핵연료 이송 통로의 역할을 한다. 기존의 차단플랜지는 볼트로 체결되어 있어서 분리 및 설치시 상당한 시간이 소요될 뿐만아니라 원형 천장크레인을 사용하여 취급되기 때문에 임계공정으로 분류된다. 발전소의 이용률 향상 및 작업자의 방사선 피폭량 저감을 위해서는 신속개폐형으로 설비개선이 요구되는 부품이다. 본 논문에서는 신속개폐형 차단플랜지를 개발하기 위해 수행된 국내 가동원전의 차단플랜지 현황 조사 및 개발방향 설정, 신속개폐형 차단플랜지의 설계요건, 상세설계, 구조해석 등의 결과를 기술한다.

#### Abstract

A Quick Opening Blind Flange(QOBF) is developed to replace the existing Blind Flange(BF) for the Korean Standard Nuclear Power Plant(KSNP). The BF provides a means for isolating the containment building from the fuel transfer tube during reactor operation. During refueling operations, it is removed to allow passage of a fuel transfer carriage. The BF is bolted to the containment penetration closure flange and is sealed to the flange by means of two elastomer rings. In the KSNP, it is difficult to handle the operations associated with removal and installation of the BF due to the size and the weight of the flange. The developed QOBF meets the same design requirements, load conditions and safety class that were specified for the existing BF. Structural integrity of the QOBF is verified by computational analysis. All component stresses and deflections are evaluated analytically to ensure compliance with specified design and operating requirements. This paper shows the design and analysis results of the QOBF.

## 1. 서론

차단플랜지는 핵연료 이송관의 원자로 건물쪽 끝단에 부착되어 있어서 원자로 정상운전 중에는 핵연료 이송관을 밀폐하여 원자로 건물의 압력경계를 형성하며, 계획예방정비기간 중에는 제거되어 핵연료를 이송할 수 있는 통로역할을 한다. 차단플랜지의 제거 및 설치는 고방사능 지역인 재장전 수로에서 수작업으로 수행된다. 한국표준형 원전(KSNP)의 경우에 이 공정은 원형 천정크레인을 사용하기 때문에 전체 재장전 공정중 임계공정으로 분류된다. 따라서 재장전기간 단축으로 원전의 이용률을 향상하고 과기부 고시 98-12[1]에 의해 더욱 강화된 작업자의 방사선 피폭량 규제요건을 만족하기 위해서는 신속하게 제거 및 설치할 수 있는 신속개폐형 차단플랜지로서의 설비개선이 요구되고 있다. 미국 전력연구소(EPRI)가 발간한 개량형 경수로 원전에 적용할 사업자요건서[2]에서도 신속개폐형 차단플랜지의 채택을 권고하고 있으며, 미국의 Palo Verde 원전과 Indian Point 원전 2호기에 신속개폐형 차단플랜지가 설치되어 사용되고 있다[3][4].

본 논문에서는 먼저 KSNP의 차단플랜지 설치현황을 조사하였다. 다음에 신속개폐형 차단플랜지의 설계 요건 정립, 차단플랜지의 상세설계 및 건전성 입증을 위한 구조해석 결과 등을 기술한다.

## 2.0 한국표준형 원전의 차단플랜지 현황

KSNP의 차단플랜지가 부착되는 핵연료 이송계통은 국내 타 원전( 웨스팅하우스 및 프라마툼 설계)의 것과 외형적으로 2가지 측면에서 상이하다.

첫째, 핵연료 이송계통의 직립기내의 핵연료 이송구(cavity)가 KSNP에는 2개인데 반하여, 타 원전의 핵연료 이송계통에는 1개이다. KSNP는 재장전 공정중 핵연료를 원자로 내에서 교체하는 셔플링(shuffling) 개념을 적용시 이점이 있다. 둘째, KSNP에서는 차단플랜지가 핵연료 이송관을 감싸고 있는 관통 슬리브에 부착되어 있는 반면에 타 원전의 경우는 핵연료 이송관에 직접 부착되어 있다. 따라서 타 원전에서는 핵연료 이송관과 그 지지구조물이 안전품목인 반면에, KSNP에서는 비안전품목으로 규정할 수 있다. 그러나, 이상의 2가지 설계 차이로 KSNP의 차단플랜지는 타 원전의 것에 비하여 현저히 커져서 약 8 ~ 10배의 무게가 더 나가며, 체결 볼트수 역시 2배 이상 많다( 표1 참조). 이상과 같은 현상은 재장전 시간의 과다소요와 작업자의 방사선 피폭량을 증가시키는 요인이 된다. 그러므로 이 요인이 본 과제에서 차단플랜지 개발 대상 원전을 KSNP로 선택한 원인이다.

가동원전에 설비개발시 주된 제약조건으로는 인접 부품 및 기기간의 공간적인 연계사항이다. 본 과제에서는 신속개폐형 체결기구를 추가로 설치하여야 하기 때문에 차단플랜지와 핵연료 이송설비와의 간극이 주된 연계사항이다. KSNP의 경우에 이 간극은 약 160 mm 로써, 체결기구 설계시 고려되어야 한다.

## 3.0 신속개폐형 차단플랜지 상세설계

### 3.1 설계요건

신속개폐형 차단플랜지의 설계, 제작 및 시험시 적용되어야 할 주된 설계요건들은 다음과 같다.

- \* 압력유지부품은 안전등급 2로 분류되며, ASME Sec. III, Division 1, Subsection NE,

- Class MC에 따라 설계하여야 한다[5].
- 품질등급은 Q 등급으로 설계하여야 한다.
- 표2의 설계하중 조건 및 하중조합하에서 구조적 건전성을 유지하고 안전 기능을 유지하도록 설계하여야 한다.
- 설계수명중 100회의 탈,부착이 가능하도록 설계하여야 한다.
- 내진범주 I 로 분류된다.
- Reg. Guide 1.100을 만족하는 설계이어야 한다.
- 설계압력 및 설계온도는 각각  $3.9 \text{ kg/cm}^2$  및  $190 \text{ }^\circ\text{C}$  이다.
- 차단플랜지는 ASME Sec. III, NE-3000의 허용응력 값을 만족하면서 설계하중을 견디도록 설계하여야 한다.
- 격납건물의 방사선 환경에 적합하도록 설계되어야 한다.
- 재장전수와 접촉하는 부품은 재장전수의 화학성분에 적합하도록 설계되어야 한다.
- 수압시험 및 공기압시험은 각각 ASME Sec. III, NE-6200 과 ASME Sec. III, NE-6300에 따라 수행되어야 한다.

### 3.2 신속개폐형 차단플랜지 상세설계

신속개폐형 차단플랜지는 주요부품은 모체플랜지(base flange), 차단플랜지(blind flange), 체결기구, O-링 및 인양기구 등으로 구성된다. 그림 1은 신속개폐형 차단플랜지의 외형도이다.

#### 3.2.1 모체플랜지

그림 2는 모체플랜지의 외형도이다. 모체플랜지는 격납건물쪽 핵연료 이송관 관통 슬리브에 44개의 볼트로 체결된다. 이것의 외부면에는 체결기구와 썰기 형태로 마찰접촉하여 밀봉력을 얻는 체결안내기구가 용접부착되고, 내부면에는 밀봉유지를 위해 밀봉셀(O-링) 2개가 설치되는 격납건물의 압력경계를 이루는 안전성 관련 부품이다. 이것의 외경 및 내경은 기존의 한국표준형 원전의 것과 동일하다.

#### 3.2.2 차단플랜지

그림 3은 체결기구가 부착된 차단플랜지의 외형도를 보이고 있다. 차단플랜지는 원자로 운전중에는 핵연료 이송관을 밀봉하고 재장전중에는 제거되어 핵연료 이송 통로를 제공한다. 이것의 외부면에는 모체플랜지와 밀봉 체결을 위한 압축력을 부여하는 체결기구가 볼트 또는 용접으로 연결되며, 내부면에는 2개의 O-링 홈이 있다.

#### 3.2.3 체결기구

원자로 운전중 차단플랜지는 체결되어 있어야 한다. 체결기구는 압축력을 생성하는 펌프, 차단플랜지의 원주상에 방사방향으로 설치되는 복동 실린더, 다중 안전성 확보를 위한 체결 핀의 체결력을 생성하는 보조 실린더, 작동유체의 유량을 조정하는 유량조절 밸브 및 하나의 압력원으로부터 8개의 실린더로 유량을 균등분배하는 유량분배기 등으로 구성된다. 차단플랜지 원주상에 방사방향으로 설치되는 실린더는 펌프 또는 압축기로부터 압축력을 받아 실린더 끝단에 연결된 체결봉을 작동하여 모체플랜지에 부착된 체결 안내기구와 마찰 접촉함으로써 밀봉에 필요한 압축력을 얻게 된다.

#### 3.2.4 인양장치

모체플랜지 및 차단플랜지에는 취급을 용이하게 하기 위해 강봉 인양장치가 설치된다.

특히 차단플랜지에는 이송시 회전을 방지하기 위해 2개의 인양장치가 설치된다.

### 3.2.5 위치안내장치

차단플랜지 체결시 정렬을 용이하게 하도록 모체플랜지의 원주상에는 2개의 위치안내장치가 용접으로 부착된다.

### 3.2.6 밀봉 씰

각 플랜지마다 2개의 O-링이 설치된다. 각 밀봉 씰의 설계제원은 표 2와 같다. 모체플랜지는 발전소 가동기간동안 부착되기 때문에 여기에 사용되는 O-링은 영구적으로 사용가능한 Grafoil 소재를 사용한 반면에, 차단플랜지는 계획예방정비기간마다 제거됨으로 기존의 O-링과 동일한 EPDM 소재로 설계하였다. O-링 설치를 위한 Groove 의 폭 및 깊이는 한국표준형 원전의 O-링과 동일한 치수로 설계하였다.

## 4.0 구조 해석

### 4.1 해석 모델

신속개폐형 차단플랜지의 건전성을 검증하기 위하여 모드해석, 응력해석 및 처짐량 등을 계산하였다. 이것의 해석모델은 범용 구조해석용 전산코드인 ANSYS를 이용하여 작성하였다. 신속개폐형 차단플랜지는 두개의 원판이 겹쳐있는 형태이므로 3차원 셀요소를 사용하여 모델하였다. 그림 4는 경계조건이 표시된 유한요소 모델을 보이고 있다. 모델 작성시 체결기구인 8개의 실린더 무게는 고려하지 않았고, 실린더를 이용한 체결상태를 나타내기 위해 체결부에 해당하는 절점을 서로 연결(coupling)하였으며, 44개의 볼트로 체결된 모체플랜지의 해당절점은 모두 구속하였다.

### 4.2 모드 해석

신속개폐형 차단플랜지의 동특성을 파악하기 위해 모드 해석을 수행하였다. 1차 고유진동수는 183.9 Hz로써 내진해석의 Zero period Acceleration(ZPA)인 33Hz 보다 상당히 높게 나타나서 동적계수를 고려한 유사 정적내진해석으로부터 구조물의 건전성을 평가한다.

### 4.3 응력 해석

신속개폐형 차단플랜지에 작용하는 설계하중의 종류와 발생가능한 하중조합은 표3과 같다. 모든 하중조합하에서 신속개폐형 차단플랜지는 건전성을 유지하여야 하는데, 이를 검증하기 위해 응력해석을 수행하였다. 안전관련 부품인 차단플랜지의 운전하중별 허용응력은 ASME Sec. III, Subsection NE에 따라 결정되는데, 표 3은 운전하중별 허용응력강도를 나타내고 있다.

A급 및 B급 운전하중에서 발생가능한 하중조합은 하중(A+D+B+F) 과 하중(E+F)의 경우이고, D급 운전하중에서는 하중(C+D+F)의 경우이다. 표 3에서 볼 수 있듯이, 응력해석 결과는 모든 부위에서 허용응력강도를 만족하고 있다. 최대 응력강도는 하중(E+F)의 경우에 발생하였는데, 이때 차단플랜지의 응력분포은 그림 5와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이, 최대 응력은 모체플랜지의 볼트체결부위에서 발생하고 있다.

### 4.4 체결부 처짐 및 반력

차단플랜지와 모체플랜지는 8개의 실린더로 체결되므로 체결력이 이 8곳에 작용한다. 따라서 체결점과 체결점 사이의 공간에서 변형이 일어나거나 차단플랜지에 설치된 O링용 groove 나 그 인근에서 변형이 일어날 경우에 누설의 가능성을 배제할 수 없다.

체결부의 최대 처짐 및 반력은 하중(A+D+B+F)의 경우에 발생한다. 이 하중에서 차단플랜지는 모체플랜지로부터 이탈하려는 힘을 받고 있기 때문이다. 그림 6은 차단플랜지의 처짐량을 보이고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 차단플랜지는 중앙부위에서 약 0.5 mm의 처짐량을 보였는데, 이것은 무시할만한 값일뿐만 아니라 O-링이 설치되지 않은 부분이므로 처짐에 의해 누설 가능성은 없다고 볼 수 있다.

차단플랜지를 모체플랜지에 체결키 위해 요구되는 실린더의 체결력은 유한요소 해석으로부터 구한 반력에 해당된다. 체결부의 최대 반력은 2854 kg로서 실린더 한 개당 요구되는 체결력을 의미한다.

## 5.0 결 언

한국 표준형 원전에 적용 가능한 신속개폐형 차단플랜지를 개발하였다. 이 설계안은 시작품으로 제작되어 체결기구의 체결력과 누설 및 공기압시험 등의 성능시험을 실시하여 현장 적용성을 검증할 예정이다. 기존의 차단플랜지를 신속개폐형 차단플랜지로 교체할 경우에 차단플랜지 설치 및 제거작업시 작업자의 수, 작업시간 및 작업자의 방사선 피폭량 등이 기존의 것보다 50 % 이상 경감될 것이다.

## 후 기

본 논문의 내용은 과학기술부의 원자력연구개발 중.장기계획 사업의 지원에 의하여 수행된 연구 결과의 일부임을 밝혀두는 바이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 자 료

- [1] 과학기술부, 방사선량 등을 정하는 기준 과기부고시 98-12, 1998.
- [2] EPRI, Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Documents, Rev. 7, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1995.
- [3] Fuel Transfer Tube Quick Operating Remote Closure Device, Combustion Engineering, Inc., US Patent No. 5,625,655, 1985.
- [4] Preferred Engineering, Fuel Transfer Tube Closure System, Private Letter, 1996.
- [5] ASME B&PV Code Sec. III, Division 1, Subsection NE, 1998 Ed.

표 1. 국내 가동원전의 차단플랜지 제원

항목	외경(mm)	두께(mm)	볼트수(ea)	무게(kg)	이송관 외경(mm)
KSNP	1683	60	44	1024	914
영광 1,2, 고리 1,2,3,4	698	43	20	125	508
울진 1,2	698	35	20	101	508

표 2. 차단플랜지에 작용하는 설계하중 조건 및 하중조합

하중 종류	하 중 설 명
하중 A	핵연료 이송관내 채워진 물의 무게
하중 B	10 m 의 정수두
하중 C	격납건물의 LOCA 하중
하중 D	지진하중(SSE)
하중 E	격납건물 시험압력(4.8 kg/cm <sup>2</sup> )
하중 F	신속개폐형 차단플랜지의 자중
하중 조합	a) D+F, b) A+D+B+F, c) E+F, d) C+D+F

표 3. 운전 조건별 허용응력 및 응력해석 결과

(단위: kg/cm<sup>2</sup>)

Service Load	Load Combination	Stress Category	Stress Criteria @190 °C	Analysis Result
Level A, Level B	A + D + B + F	Pm	1,085	290
		Pm + Pb	1,631	291
	E + F	Pm	1,085	666
		Pm + Pb	1,631	668
Level C	-	Pm	1,085	-
Level D	C + D + F	Pm + Pb	1,631	-
		Pm	1,302	557
		Pm + Pb	1,953	559

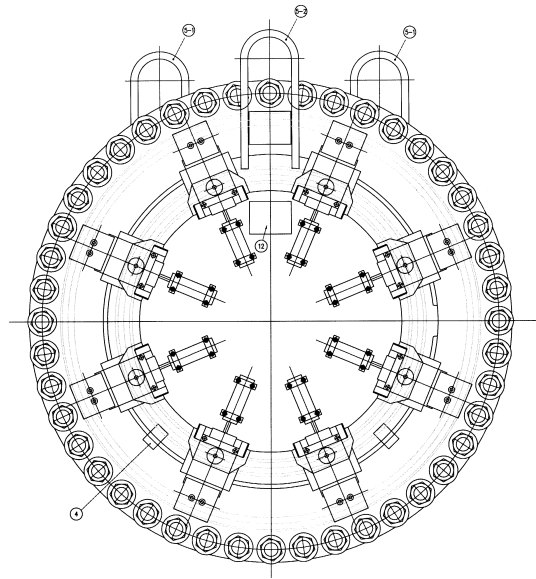


그림 1. 신속개폐형 차단플랜지 외형도

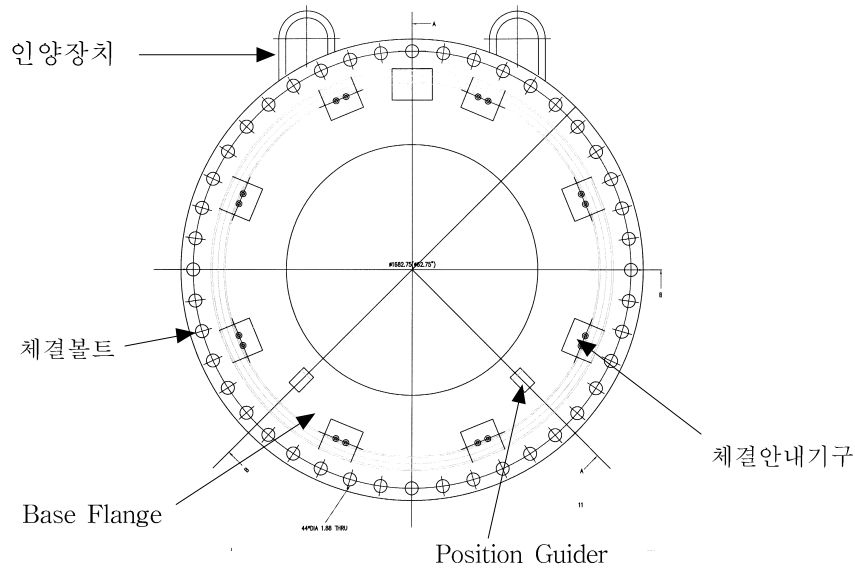


그림 2. 모체플랜지 외형도

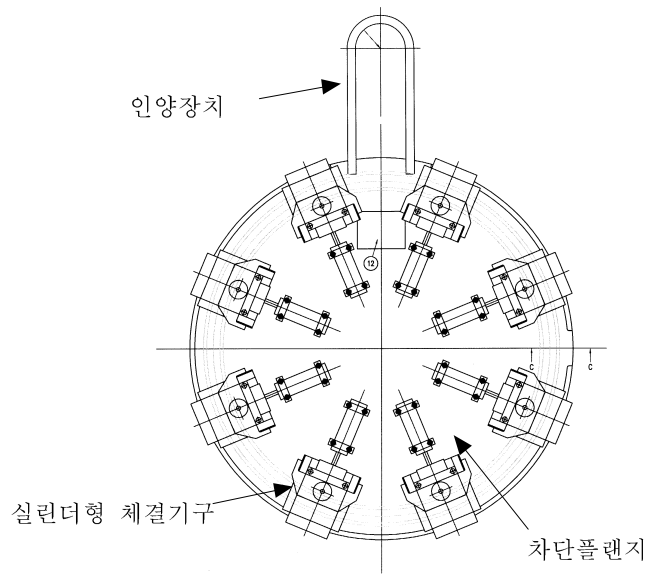


그림 3. 체결기구가 부착된 차단플랜지 외형도

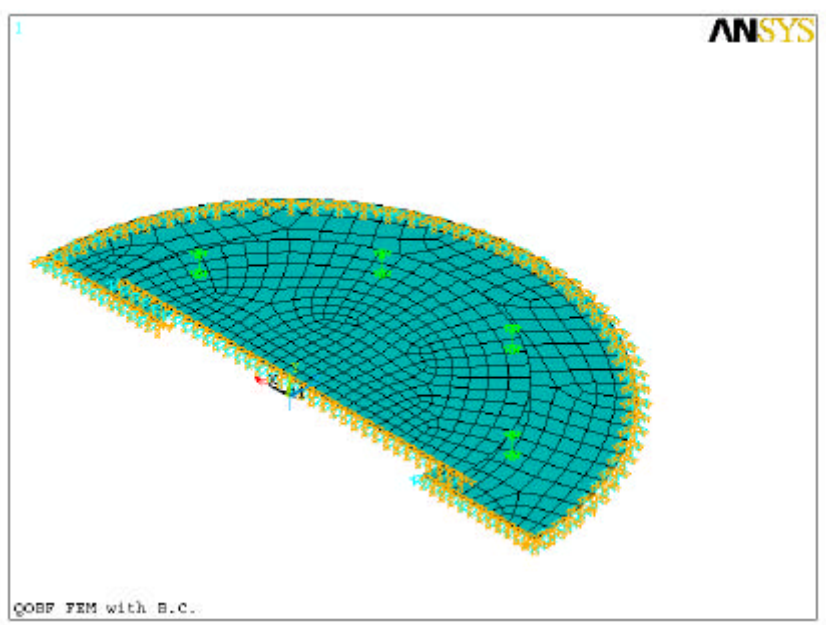


그림 4. 유한요소 모델의 경계조건



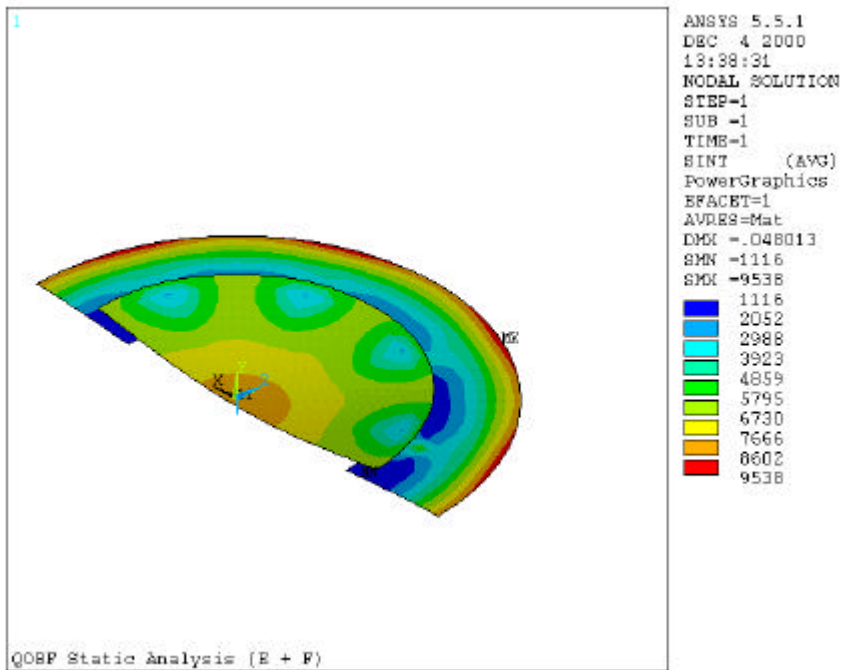


그림 5. 하중(E+F)에서의 응력분포

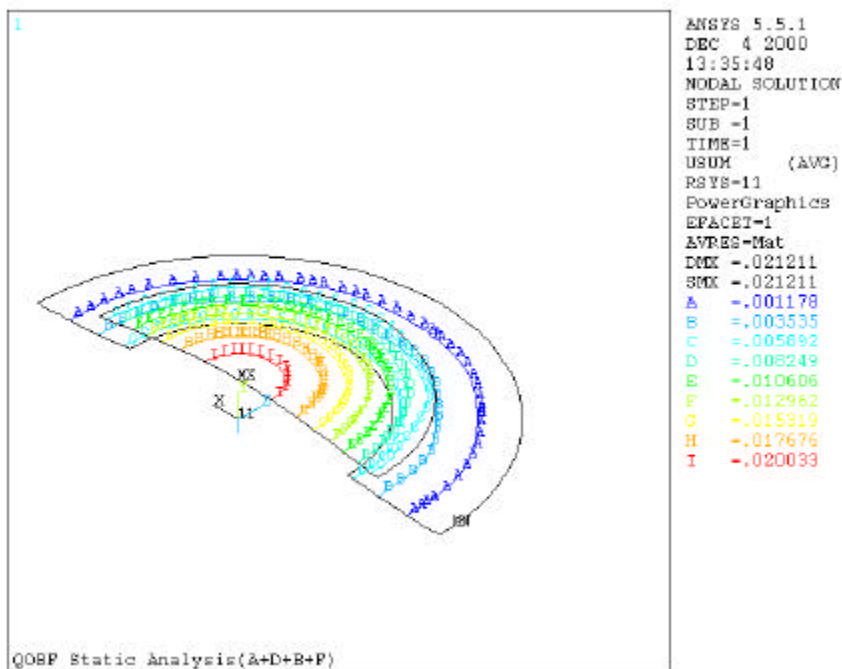


그림 6. 하중(A+D+B+F)에서의 플랜지 처짐량