

# 가스배관의 원주용접부 결함평가 기준에 관한 연구

장영균, 김종욱, 최재봉, 김영진, 이승림\*, 김성문\*, 김우식\*\*  
성균관대학교 기계공학부  
한국가스안전공사\*  
한국가스공사\*\*

## A Study on the Flaw Assessment Standards on Girth Welds of Gas Pipelines

Y.K. Jang, J.W. Kim, J.B. Choi, Y.J. Kim, S.L. Lee\*, S.M. Kim\*  
Sungkyunkwan University  
Korea Gas Safety Corporation\*  
Korea Gas Corporation\*\*

### 1. 서론

1950년대 이후, 편리하고 경제적인 에너지원의 수송방법으로 배관의 설치는 크게 각광받아왔으며 현재 많은 에너지원의 원거리수송이 배관을 통해 이루어지고 있다. 특히 북미, 유럽, 오세아니아와 아시아 등지에서는 수천 내지 수만 킬로에 달하는 배관을 통해 천연가스나 원유 등을 수송하고 있다. 수송용 배관은 초기설치비용만 해결되면 에너지원을 생산현장으로부터 안정적으로 공급받을 수 있다는 장점 외에도 관리운영에 드는 비용이 매우 저렴하다는 이유로 가장 실용적인 에너지수송시스템으로 평가받고 있다. 국내에서도 이러한 배관 수송의 장점을 활용하고자 저장기지를 중심으로 국내의 소비자를 연결하는 대규모의 배관망이 설치되어 있으며 이를 계속 확장하고 있다. 그러나 이러한 수송용 배관의 설치증가와 함께 배관파손에 의한 사고 사례 또한 증가하는 추세에 있다. 실제 이러한 파손은 천연가스와 같은 폭발성이 있는 에너지원의 누출로 인한 대형 사고나 환경오염문제 등으로 직결되기 때문에 그 대책마련에 세계 각국이 지대한 노력을 기울이고 있는 실정이다.

일반적으로 수송용 배관은 경제성과 제작의 용이성을 고려하여 저합금 탄소강 (low alloy carbon steel)을 사용하여 제작한다. 그러나 이러한 강관의 경우, 부식이나 지속적인 피로하중 등으로 인하여 합몰부위나 결함이 발생하는 사례가 빈번하다. 특히 배관부에 존재하는 결함은 그 선단에서의 응력집중으로 인해 파손 및 에너지원 누출사고의 주범으로 판단되고 있다. 따라서 이러한 결함이 존재하는 배관의 건전성평가는 배관의 파손사고 방지를 위한 가장 중요한 선결문제로, 1950년대 이후 선진각국의 지속적인 연구대상이 되어왔다. 이러한 노력의 결과로 미국의 API 1104 (Welding of Pipelines and Related Facilities) Section VI[1] 등이 배관파손방지를 위한 기본 기준(Workmanship Standards; WMS)으로 개발되

어 널리 사용되어 왔다. 이러한 Workmanship Standards는 전통적인 해석기법을 기초로 매우 보수적으로 작성되었으며, 따라서 허용할 수 있는 결함의 크기나 종류 또한 안전확보의 측면에서 매우 제한적으로 설정되었다. 1960년대 이후 결함에 대한 해석요구의 증가로 파괴역학이 실용적인 학문으로 발전함에 따라 각종 결함에 대한 파괴역학적인 해석능력이 축적되었으며, 이에 따라 이러한 파괴역학적 해석기법을 도입한 보다 기술적인 기준의 필요성이 제기되었다. 이러한 기준들은 공학적 해석기법(Engineering Critical Analysis; ECA)에 기초한 사용적합성(Fitness For Purpose; FFP) 형식의 기준으로 분류되었다.

현재 국내의 가스배관 결함평가는 매우 보수적인 기준(Workmanship Standards)만이 존재하며 이를 배관설치시 일관적으로 적용하고 있다. 선진국에서 사용중인 ECA/FFP 방식의 기준은 아직 국내배관에 대해 적용이 이루어지지 않고 있으며, 이로 인해 배관의 경제성있는 유지보수가 어려운 형편이며 결함에 대한 정확한 해석능력도 미비한 실정이다. 국내실정과 같이 가스배관 주변으로 인구밀집도가 높고 잦은 수해와 토목공사로 인한 변동하중이 빈번하게 발생하는 상황에서 사고의 위험성은 매우 크다고 할 수 있다. 또한 빈번한 보수와 교체는 불필요하게 비용과 자원을 낭비하게 되므로 경제적 측면에서 바람직하지 않다. 따라서 파괴역학적인 해석능력에 근거한 사고방지대책의 확립과 함께 보다 경제적이고 효율적인 배관 보수관리를 실현하기 위해 국내실정에 적합한 ECA/FFP 형식의 결함평가 기준 작성은 시급한 것으로 판단된다.

## 2. 가스배관의 결함평가기준 현황

배관의 용접부 결함평가를 위한 기준은 크게 WMS와 ECA의 두 가지로 분류할 수 있다. WMS는 수십년간의 현장경험을 기초로 작성한 기준으로서 균열길이를 가장 중요한 인자로 평가한다. 이러한 평가기준은 수십년간 배관 안전에 대한 높은 신뢰성을 보장해 왔다. 특히 해석이 어려운 불확실한 부분에 매우 높은 안전계수를 적용함으로써 안전성확보를 추구하는 매우 보수적인 기준으로 알려져 있다. 한편, 이의 대체 허용기준으로 사용되는 ECA는 파괴역학적인 이론을 기초로 작성된 것으로, 해석 대상을 제한하는 FFP방법을 적용하며 균열의 길이뿐 아니라 높이를 함께 고려하여 평가하는 방법이다. 이 기준은 공학적인 해석절차가 요구되므로 개발에 많은 연구와 입증된 결과를 필요로 한다.

WMS는 사고에 의한 피해우려가 큰 지역이나 위험도가 높을 것으로 판단되는 지역에 배관을 설치하는 경우 엄격하게 적용되는 신뢰성 높은 기준으로서, 파괴역학적인 해석없이 경험에 의존하여 배관의 허용결함길이를 규정하여 보수 또는 사용 허용 여부를 결정한다. 그러나, 이 기준은 배관에 작용하는 응력이나 파괴인성치 등을 고려하지 않은 채 비파괴 검사 후 검출된 결함의 길이만으로 판정함으로써 지나친 경직성 및 보수성을 내포하고 있다. 대표적인 WMS 기준으로는 API 1104 Section VI와 KS B 0845에 기초한 산업자원부 고시 “배관 등의 용접 및 비파괴시험기준”[2] 등이 있다.

WMS의 보수적인 결함평가기준은 매우 높은 신뢰도를 보장해 주는 반면, 기준 자체에 내포된 지나치게 높은 안전계수로 인하여 비경제적일 뿐만 아니라 오히려 불필요한 보수로 인한 재료의 강도저하 및 수명단축 등을 야기할 수도 있는

것으로 알려져 있다. 이에 선진각국에서는 결함평가를 보다 현실화하고 발견되는 결함의 길이 뿐 아니라 높이를 함께 고려하여 파괴역학적 해석을 수행하는 FFP 형식의 ECA 평가법 개발에 주력하고 있다. ECA는 WMS의 지나친 보수성을 보완하기 위해 제정되었으며 배관에 작용하는 응력, 재료의 파괴인성치, 결함의 형상을 기초로 파괴역학적 해석을 수행하여 결함을 평가하는 방법이다. 또한 결함의 발생이 빈번한 특정부위에 대한 구체적인 해석기법을 개발하여 FFP형식으로 적용하는 것이 일반적이다. 가스 공급배관의 경우, 배관과 배관을 연결하는 원주방향 용접부에서의 균열발생이 빈번하여 이를 고려한 ECA기준이 각국별로 제시되었는데, 대표적인 기준으로는 미국의 API 1104 Appendix A (1994), 영국의 BS 4515 Appendix H (1987) 그리고 캐나다의 CSA Z662 Appendix K (1996), 일본의 WES 2805 (1980) 등이 있다[3~6]. 이러한 기술기반의 세분화된 결함평가 기준의 등장으로 선진 각국은 보다 경제성있는 배관의 운영과 안전성의 향상을 동시에 실현하였으며, 현재 이를 보다 발전시키고자하는 연구가 다양한 각도로 진행되고 있다. 특히 천연가스 유전이 가장 많은 캐나다에서는 이러한 결함이 수송용 배관의 유지보수비용에 미치는 막대한 영향을 고려하여 심도있는 연구와 이를 바탕으로 한 결함평가의 기준을 지속적으로 수정 제시하고 있다. 1986년 제정된 캐나다 기준 CSA Z184 코드(현재는 CSA Z662 (1996)로 수정)는 실제 배관에 균열부를 삽입하여 파손테스트를 수행한 후 이를 근거로 하여 작성되었으며, 현재는 수치해석방법 등을 통해 이 기준의 수정 보완이 검토 중에 있다. ECA를 결함평가기준으로 적용하기 위해서는 용접절차 인증시험, 응력해석, 검사 등 복잡한 해석절차가 필요하며, 결함의 허용기준을 설정하기 위해서는 많은 실험과 해석기술이 뒷받침되어야 한다. 현재 선진각국에서는 이러한 ECA의 적용을 통해 막대한 경비절감과 효율적이고 안전한 배관관리를 실현하고 있으나, 국내에서는 그 적용이 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내 사용중인 WMS 기준을 선진각국의 ECA 기준과 비교분석하고, 국내 적용 가능한 ECA 기준에 대해 분석 기술하였다.

결함이 존재하는 가스배관의 파손형태는 파괴역학적인 측면에서 크게 취성과 파괴(brittle fracture), 연성파괴(ductile fracture) 그리고 소성붕괴(plastic collapse)의 세가지로 분류할 수 있다. ECA 평가기준은 3가지 파손형태를 모두 고려하여 작성하는 것이 일반적이다. 원자력배관과 같이 가동압력이 매우 높고 직경에 비해 두께가 두꺼운 배관에 대해서는 취성파괴 및 소성붕괴는 물론 연성파괴기준을 많이 적용하고 있다. 그러나 가스배관과 같이 두께가 상대적으로 얇은 경우에는 취성파괴기준과 소성붕괴기준을 결합한 형식으로 평가기준을 작성한다.

### 3. 선진각국의 결함평가기준 비교

본 연구에서는 선진각국이 사용중인 ECA 결함평가 기준에 대해 비교 분석하고 이를 기술하였다. 이 결함평가 기준들은 각각 결함판정에 대한 접근방법과 작성배경이 서로 다르다. 각 기준들의 평가방법 및 허용결함크기의 차이점에 대해서 국내 사용중인 KS B 0845/산업자원부 고시와 함께 비교하여 Table 1에 수록하였다.

#### 4. 가스배관의 원주용접부 대체 결함평가 기준(안) 작성개요

“가스배관의 원주용접부 대체 결함평가 기준(안)”은 가스배관의 원주방향 용접부에 대한 FFP (Fitness-For-Purpose) 형식의 대체허용기준을 적용하기 위한 방안으로 제시한 것으로서, 국내에서 현행 시행중인 결함평가기준과 미국 및 캐나다에서 사용중인 대체 결함평가기준을 모태로 하여 작성하였다. 본 기준은 API 1104 Appendix A의 내용과 형식을 기반으로 작성하였으며, 소성붕괴에 대한 고려를 위해 CSA Z662 Appendix K의 소성붕괴 해법을 적용하였다. API와 CSA 기준은 Table 1에 비교한 바와 같이 모두 취성파괴를 고려하여 결함의 최종허용길이를 제시하고 있으며, API는 소성붕괴에 대해서 고려하지 않는 반면, CSA는 실배관 테스트를 바탕으로 작성한 소성붕괴의 기준을 적용하여 결함의 허용길이를 산정한다.

#### 5. 가스배관의 원주용접부 대체 결함평가 기준(안)의 주요내용

##### 5.1 적용조건 및 용접절차

“가스배관의 원주용접부 대체 결함평가 기준(안)”의 적용조건은 API 1104 Appendix A에서 명시한 제약조건(예를 들면, 최대허용 축방향변형률, 스펙트럼 가속도 등)을 모두 반영하여 작성하였으며, 용접절차는 한국가스공사의 용접 및 비파괴검사 절차서[7]의 내용에 준하여 규정하였다. 용접절차인정을 위한 CTOD 시험은 최소파괴인성치 요구조건을 0.127 mm 또는 0.254 mm로 규정하였으며, 입열량의 최대값과 최소값에 대해서 용접절차인정시험을 수행하도록 명시하였다. API 1104 Appendix A에 기술된 용접절차의 재인정을 필요로 하는 세부적인 용접공정 또는 적용방법 변화 등의 항목은 국내실정을 고려하여 삭제하였다.

##### 5.2 파괴 인성 시험

본 허용 기준을 사용하기 위해서는 실제 시험을 통해 용접부의 파괴인성치를 결정해야한다. 본 기준에서는 CTOD 시험법을 적용하고 0.127 mm 또는 0.254 mm를 최소파괴인성치의 기준으로 사용한다. CTOD 시험은 BS 7448[8] 또는 ASTM E 1290[9]에 따라 수행해야 하며, 권장시편(B×2B)을 사용해야 한다. Fig. 1은 CTOD 시험법을 적용한 원주방향 결함의 허용한계를 나타내고 있으며, 두께방향으로의 허용결함 높이는 벽두께의 1/2을 초과할 수 없다.

##### 5.3 결함의 허용한계

###### 5.3.1 평면 결함

검출된 결함에 대한 허용여부를 결정하기 전에 결함의 길이와 높이는 적절한 비파괴 검사법에 의해 결정하거나 정확한 크기를 판단해야 한다. 결함을 확인하기 위해 방사선기법을 사용하는 경우에는 결함의 높이를 측정하기 위한 다른 방법이 수반될 경우에만 인정된다. 원주방향 평면 결함의 허용길이는 결함간격을 고려하여 결함의 상호작용 여부를 결정하고, 결함을 내부 또는 표면결함으로 분류하여 CTOD 기준에 의한 유효결함길이( $l_1$ )와 유효결함높이( $a$ )를 산출한다. 횡방향 균열(transverse cracks)과 같이 원주 용접부를 횡단하는 평면결함은 보수하거나 제거해야 한다.

### 5.3.2 체적 결함

높은 파괴인성치를 갖는 재료 속에 존재하는 슬래그나 기공(porosity) 등의 내부 체적 결함은 평면 결함처럼 취급하여 Fig.1의 기준에 따라서 평가한다.

### 5.3.3 아크스트라이크

보수되지 않은 아크스트라이크에 대한 허용 한계는 Table 2의 하단에 수록하였다. 육안이나 방사선 투과사진으로 식별할 수 있는 균열을 포함하는 아크스트라이크에 대해서는 본 기준을 적용할 수 없으며 보수 또는 제거해야 한다.

### 5.3.4 소성붕괴를 고려한 결함의 최대허용길이

배관의 원주방향 용접부에 존재하는 결함에 대해 소성붕괴를 고려한 결함의 최대길이( $l_2$ )는 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$l_2 = \pi D (1.03 - \sigma_a / \sigma_y) / (18 a/t)$$

여기서,

- D : 배관의 바깥지름, (mm)
- $\sigma_a$  : 최대허용인장굽힘응력, (MPa)
- $\sigma_y$  : 규정최소항복강도, (MPa)
- a : 결함의 높이, (mm)
- t : 배관의 벽두께, (mm)

### 5.3.5 배관의 직경을 고려한 결함의 최대허용길이

배관의 직경을 고려한 결함의 최대길이( $l_3$ )는 원주 둘레의 10% 이하여야 한다.

### 5.3.6 최종 허용결함길이의 결정

위 조건들에 맞는 결함길이  $l_1, l_2, l_3$ 를 비교하여 이중 최소값을 최종 허용결함길이( $l$ )로 결정하며, 이 때의 허용결함높이는  $a$ 이다.

## 5.4 결함의 평가 및 적용사례

결함의 허용한계는 API 1104 Appendix A의 CTOD 기준에 준하여 명시하였으며, 소성붕괴를 고려하기 위하여 CSA Z662 Appendix K의 소성붕괴 해법을 인용하였다. 슬래그나 기공 등의 내부 체적 결함은 평면결함처럼 취급하여 평가하였으며, 아크스트라이크에 대한 허용한계는 허용폭과 길이, 높이를 모두 나타내었다. 소성붕괴해석에 적용되는 최대허용 인장굽힘응력은 축방향응력이 인장응력으로 작용할 때는 작용인장응력의 1.5배에 해당하는 값과 잔류응력을 제외한 축방향응력값들의 합으로 계산되며, 축방향응력이 압축응력으로 작용할 때는 잔류응력을 제외한 축방향의 응력값들의 합으로 계산된다. 일반적으로 최대허용 인장굽힘응력은 규정최소항복강도의 70~80%의 값을 가지며, 이 때 배관 설치시의 토압이나 배관의 직경 및 두께를 고려한다.

국내 가스공급배관의 주배관으로 주로 사용되는 지름 762.0 mm(30 inch), 벽두께 17.5 mm(0.689 inch)의 API-5L-X65 배관의 결함에 대해 본 원주용접부 대체

결함평가 기준(안)을 적용하여 결정한 최종허용치수는 Table 2와 같다. 표면결함의 경우, 최종결함높이가 3.11 mm 미만인 결함은 소성붕괴를 고려한 허용결함길이( $l_2$ )가 최종결함길 이로 결정된다. 최종결함높이가 3.11 mm 이상 ~ 7.49 mm 미만인 결함의 경우, CTOD 기준의 취성과파괴를 고려한 허용결함길이( $l_1$ )가 최종결함길 이로 결정된다. 최종결함높이가 7.49 mm 이상인 결함은 허용되지 않는다. 본 허용기준을 분석한 결과 최종허용결함길이는 CTOD 기준과 소성붕괴 기준에 의해 결정되며 어느 특정기준에 의해 지배받지 않는 것으로 나타났다. 따라서 본 기준에서 제시한 두가지 평가기준의 조합은 타당한 방법으로 판단된다. 만약 본 기준에 준하여 결함이 허용 가능한 경우에는 보수나 절단(cutout)은 불필요하지만, 결함의 형태나 위치, 크기를 기록, 저장해야 한다. 만약 결함이 허용될 수 없는 범위라면, 보수나 제거는 필수적이다.

## 6. 결론

“가스배관의 원주용접부 대체 결함평가 기준(안)”은 기존의 결함평가기준(WMS)의 보수성을 고려하여 파괴역학적 해석과 소성붕괴해석을 적용하여 작성한 것으로서, 배관결함에 대한 파괴역학적 평가기준 확보와 향후 기준에 대한 검증 및 보안을 통해서 불필요한 보수·교체로 인한 경제적 손실 방지를 기대할 수 있다. 또한 사용연한이 증가하고 있는 노후 중저압 도시가스배관의 안전성평가 기법 및 기준개발을 위한 기초자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

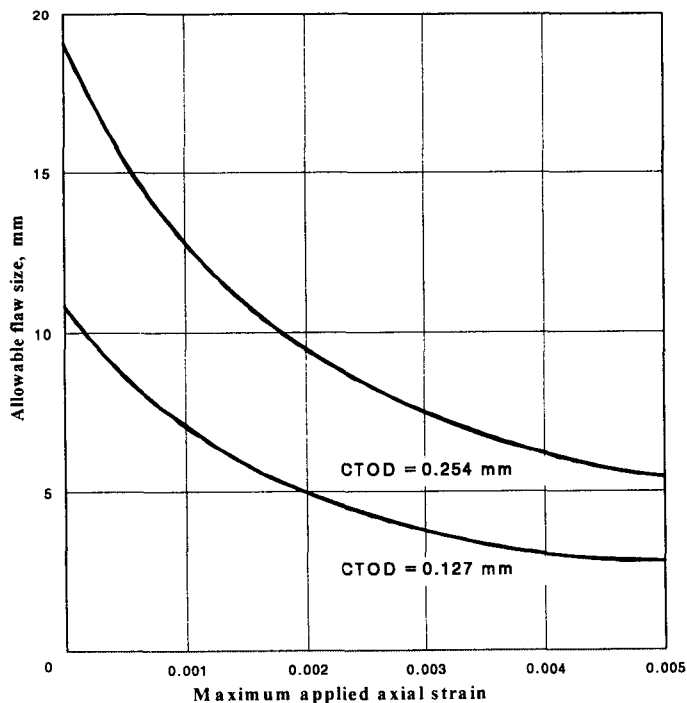


Fig. 1 Alternative acceptance criteria for circumferential flaws

Table 1 Comparison of ECA/FFP

국가명	미국	영국		캐나다	일본	한국
규격	API 1104 App.A	BS 4515 App.H	PD 6493 <sup>(10)</sup>	CSA Z662 App.K	WES 2805	KS B 0845 /산자부 고시
평가대상	탄소강관의 용접이음부	강관의 용접이음부	스테인레스강, 알루미늄 합금의 용접	강관의 용접이음부	일반구조용 강, 강관 및 용접구조물	강의 용접이음부
결합의 종류	내부결합,기공 표면결합, 슬래그 등	내부결합, 균열, 표면결합, 용락	관통결합,기공, 표면결합,슬래그, 내부결합 등	내부결합, 표면결합	관통결합, 표면결합, 내부결합 등	기공, 슬래그, 균열, 용락 등
파괴평가	Dawes <sup>(11)</sup> 의 CTOD설계선도	Dawes의 CTOD설계 선도	Dawes의 CTOD설계 선도	Dawes의 CTOD설계선도	일본설계 선도	등급분류방법
배관두께	제한 없음	10mm < t < 30mm	10mm 이상	제한 없음	제한 없음	$t = \sqrt{\frac{2.5(0.2hK_I - K_I W)}{100\sigma}} D_0$
소성붕괴	적용안함	적용안함	고려함 (Willoughby <sup>(12)</sup> 실험식)	고려함 (실베관실험식)	결함크기 재분류	적용안함
파괴역학 파라미터	CTOD	CTOD	CTOD	CTOD	CTOD	적용안함
최대결합 길이	0.4D	0.016Dt	소성붕괴	0.1 πD	-	-
최대결합 높이	0.5t	3mm	-	0.5t	0.5t	-
최대작용 응력	0.5% 축변형률	$\sigma_Y$	$\sigma_Y$ 이상	1.03 $\sigma_Y$	$\sigma_Y$ 이상	-
산류응력	$\sigma_Y$	$\sigma_Y$	-	고려안함	0.2 $\sigma_Y$	-

Table 2 An example of alternative acceptance criteria

(unit : mm)

결합 형태	최종허용기준		세부허용기준		
	최종결합높이 (a)	최종결합 길이 (l)	허용결합 길이 (l <sub>1</sub> )	허용결합 길이 (l <sub>2</sub> )	허용결합 길이 (l <sub>3</sub> )
표면 결함	0 이상 ~ 3.11 미만	209.5	304.8	209.5	239.4
	3.11 이상 ~ 7.49 미만	70.0	70.0	87.0	239.4
내부 결함	0 이상 ~ 3.11 미만	209.5	304.8	209.5	239.4
	3.11 이상 ~ 7.49 미만	70.0	70.0	87.0	239.4
아크스트라이크	1.59 <sup>a</sup>	7.94 <sup>b</sup>	-	-	-

비고 <sup>a</sup> 허용깊이

<sup>b</sup> 허용폭과 허용길이

## 참 고 문 헌

1. "Acceptance Standards for Nondestructive Testing", API 1104 Section 6, pp. 22~29(1994).
2. 산업자원부고시 제1999-34호 제6장 제4절 "배관 등의 용접 및 비파괴 시험기준"(1999).
3. "Alternative Acceptance Standards for Girth Welds", API 1104 Appendix A, pp. 47~57(1994).
4. "Specifications for Field Welding of Carbon Steel Pipelines, BS 4515 Appendix H, British Standards Institution, London(1987).
5. "Standards of Acceptability for Circumferential Pipe Butt Welds Based on Fracture Mechanics Principles", CSA Z662 Appendix K, pp. 303~315(1996).
6. "Methods of Assessment for Defects in Fusion-Welded Joints with Respect to Brittle Fracture", WES 2805, The Japan Welding Engineering Society, Tokyo(1980).
7. "용접 및 비파괴검사 절차서", 한국가스공사(1996).
8. "Fracture Mechanics Toughness Tests", BS 7448 Part 2(1997).
9. "Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement(CTOD) Fracture Toughness Measurement", ASTM E 1290(1993).
10. "Guidance on Some Methods for the Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints", PD 6493, British Standards Institution, London(1980).
11. Dawes, M.G., "The CTOD Design Curve Approach: Limitations, Finite Size and Application", T.W.I Research Report(1980).
12. Willoughby, A.A., "A Survey of Plastic Collapse Solutions Used in the Failure Assessment of Part Wall Perfects", Welding Institute Report, Cambridge TWI Research Report 191(1982).