

# 프레스가공의 최적 성형범위에 미치는 강판특성 및 윤활조건의 영향

박 기 철\*, 최 원 집\*\*

\* POSCO 기술연구소 냉연연구팀

\*\* 산업과학기술연구소 철강제품연구본부

## The effect of sheet steel properties and lubrication on the optimal range of blank holding force of stamping processes

K. C. Park\*, W. J. Choi\*\*

\* POSCO, Technical Research Laboratories

\*\* RIST, Steel Products Research Division

### ABSTRACT

The effect of sheet steel properties and lubrication on the optimal range of blank holding force (BHF) was investigated by means of the model die stamping of various sheet steels. The optimal range of blank holding force was expressed as the range between the lower BHF at flange wrinkling and the upper BHF at local necking.

It showed that mechanical properties, thickness of sheet steel and lubrication condition were important factors affecting the optimal range of BHF in sheet steels. Especially, lubrication condition played an important role in the case of coated sheet steels.

Keywords : Sheet Metal Forming, Wrinkling, Crack, Blank holding Force Range, Lubrication

### 1. 서 론

입고소재의 재질변동이나 강판 재고기간의 차이 그리고 미소한 금형조건의 변동 등

에 따라서 가공시에 강판에 가해지는 변형과 구속이 바뀔 소지가 많다. 이와같은 요인에 의해서 설정된 블랭크홀더력이 성형가능범위를 벗어나게 되면 가공불량이 유발되고 이에따라 생산성이 떨어지게 된다. 가공가능한 블랭크홀더력의 범위가 넓은 강판을 사용하면 재료나 가공조건에서의 변동이 바로 불량발생으로 연결되는 것을 방지할 수 있어 생산성 향상에 도움이 된다. 따라서 강판간의 성형성 비교를 위해서 특정 시험용 금형에 대하여 성형가능한 블랭크홀더력의 범위를 비교하는 시험이 많이 이용되고 있다.

드로잉가공에 있어서 최적의 블랭크홀더력은 주름이나 기타 형상불량이 발생하지 않는 최저값이다. 블랭크홀더력이 필요이상 커지면 플렌지부의 변형구속이 커져서 가공중의 펀치하중이 증가하며, 이 하중을 변형부에 전달하는 부분에 작용하는 응력이 판재의 인장강도 이상이 되면 파단이 발생하게 된다. 원통드로잉 (cupping) 같은 간단한 공정에서도 적정 블랭크홀더력을 이론적으로 구하기는 매우 곤란하기 때문에 실험식<sup>4)</sup>들이 이용되고 있으며 그 일례를 보면 다음과 같다.

$$H = \frac{(\sigma_B + \sigma_r)}{180} \cdot D \cdot \left\{ \frac{D - d_d - 2r_d}{t} - 8 \right\} \quad (1)$$

- H : 주름이 발생하지않는 최소 BHF (kg)
- D : 블랭크 직경 (mm)
- d<sub>d</sub> : 다이 직경 (mm)
- r<sub>d</sub> : 다이어깨 곡률반경 (mm)
- t : 블랭크 두께 (mm)
- σ<sub>B</sub> : 인장강도 (kg/mm<sup>2</sup>)
- σ<sub>r</sub> : 항복응력 (kg/mm<sup>2</sup>)

(1) 식을 사용하든지 또는 원통드로잉의 경우에 최대 드로잉하중의 1/2 - 1/3 정도로 설정하여 적용할 수 있다. 한편 원형이외의 경우에 대해서는 제품형상을 원형으로 환산한 수치로 계산한 값을 기준으로 그 전, 후값을 시험해서 적정조건을 찾는 것이 효과적이다.

한편 가공에 필요한 드로잉하중에는 다수의 요인들이 관계하고 있다. 원통드로잉의 경우 가공에 필요한 펀치하중을 구성하는 요소는 다음과 같다.

- 플렌지부를 수축시키는 데 소요되는 하중
- 펀치와 다이 등에서 급힘-급힘회복 변형에 필요한 힘
- 블랭크홀더 및 다이와 시편과의 마찰력

위의 세 성분의 합이 가공에 소요되는 드로잉하중이다. 그러나 본질적으로는 플렌지부의 수축에 필요한 힘이 제일 기본이고 마찰력은 블랭크홀더력이 증가하면 커

져서 드로잉하중을 증가시킨다. 시편의 드로잉하중이 벽부에서 지지가능한 최대하중에 도달하면 파단이 발생하게 된다. 원통드로잉의 경우 벽부분에서 지지가능한 최대하중  $P_b$  는 다음과 같다.

$$P_b = \pi \cdot (d_p + t) \cdot t \cdot \sigma_B \quad (2)$$

$d_p$  : 펀치직경

### 3. 가공조건에 따른 플렌지부의 주름발생 경향

판재 플렌지부는 드로잉 가공중에 압축변형을 받는 부분으로 블랭크홀더력에 의하여 평면외 변형을 구속하지 않으면 주름이 발생하게 된다. 주름발생을 억제하는 BHF의 변화에 따른 주름발생 경향과 주름발생에 미치는 제 인자의 영향을 보기 위하여 Table 1 과 같은 기계적 특성을 갖는 시편으로 특정 BHF 에서의 드로잉 깊이 변화실험과 윤활유 변경실험 등을 하였다. 주름의 높이는 다이얼게이지와 지점거리 25mm 인 기구에 의하여 Fig.3 과 같은 성형품의 네 모서리 플렌지 부분에서 각 모서리의 제일 큰 주름높이를 측정하여 그 평균값으로 평가하였다. 실험에는 점도가 117cPs 인 윤활유를 사용하였다.

Fig.4 는 BHF 가 25ton 일때 CR-1(0.87t) 와 CR-2(0.70t) 시편에 대하여 성형깊이 (drawing depth) 에 따른 주름 높이의 변화를 보여준다. CR-1(0.87t) 시편에 대하여 25ton 의 BHF 는 주름억제에 충분치 못하여 드로잉깊이가 깊어질수록 주름높이는 커진다. 한편 CR-2(0.70t) 시편인 경우 25ton 의 BHF 는 드로잉시의 플렌지부 수축변형에 따른 주름발생을 억제하기에 충분하여 드로잉 깊이에 따른 주름 높이의 증가가 없음을 알 수 있다. Fig.5 에서는 CR-2(0.70t) 시편을 이용하여 BHF 가 25ton, 17.5ton, 15ton 일때의 드로잉 깊이에 따른 주름높이 변화를 나타내었다. BHF 가 25ton 에서는 BHF 가 주름 발생억제에 충분하여 주름이 전 드로잉 깊이에서 증가하지 않는다. BHF 가 17.5ton 에서는 90mm 깊이까지는 주름높이가 어느 정도 증가하다가 최종단계에서는 감소하였다. 이는 플렌지부 재료가 유입함에 따라 플렌지부의 면적이 줄어들어 BHF 에 의한 주름억제효과가 커진 때문으로 보인다. BHF 가 15ton 인 경우는 BHF 가 너무 작아 주름높이는 드로잉 깊이가 증가함에 따라 계속 증가되었다. 따라서 블랭크홀더력이 15ton 이면 주름억제에 불충분하며 25ton 은 충분하고 17.5ton 은 주름발생을 억제하는 하한 BHF 임을 알 수 있다.

Fig.6 은 BHF 변경에 따른 네가지 시편의 주름높이 변화를 국부네킹이 생길때까지 측정된 것이다. 측정결과 시편에 따라 주름높이가 급격하게 줄어드는 BHF 가 서로 다름을 알 수 있다. 그리고 일단 주름의 높이가 줄어든 다음에는 주름이 작은 일정한 값을 가짐을 알 수 있다. 주름높이와 국부네킹에 미치는 시편의 기계적 특성의 영향은 다음 장에서 고찰하였다. Fig.7 은 CR-1(0.87t) 강판에서 BHF 변경에 따른 주름높이의 변화를 측정된 것으로 윤활유의 점도가 117cPs 인 고점도유와 18cPs 인 저점도유를 사용한 결과이다. 실험결과 점도가 작은 경우에는 주름억제에

필요한 하한 BHF가 낮고, 점도가 큰 경우는 높아짐을 알 수 있다. 가공크랙 발생으로 판단하는 상한 BHF는 점도가 높은 쪽이 마찰계수가 작아지므로 큰 상한 BHF를 갖는다. 이것으로 부터 강판과 금형사이의 마찰이 커지면 주름발생을 억제하는 효과가 있으나, 블랭크홀더력이 커지면 플렌지부에 마찰력이 너무 커지게 되어 가공크랙이 쉽게 발생됨을 알 수 있다.

Fig.8 은 주름발생에 미치는 두께의 영향을 보기 위하여 Table 1 의 인장특성치에서 재질이 거의 동일한 시편인 CR-2(0.70t) 와 CR-4(0.75t) 두 소재의 주름 높이를 크랙이 발생하는 BHF 범위까지 비교한 것이다. 두께가 두꺼운 쪽이 주름억제를 위한 BHF (하한 BHF) 가 크고 좌굴높이도 크게 됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 식 (1)에 소개된 원통드로잉의 경우와는 상반되는 결과이다. 그 이유는 원통드로잉과 달리 사각드로잉에서는 플렌지부가 대칭이 아니고 비드가 설정되어 있어 블랭크홀딩시와 펀치가압시에 어느정도 주름이 생기기 때문에 두꺼운 시편일수록 블랭크홀더로 가압하여 이들을 없애기 위해서 소요되는 하중이 커지기 때문으로 보인다.

#### 4. 강판에 따른 판재의 가공범위

강판의 특성에 따른 판재가공의 적정 블랭크홀더력 범위를 알아 보기 위하여 Table 1 의 냉연 및 도금강판에 대해 모델금형을 이용한 성형실험을 하였다. 성형 가능범위는 모델금형 성형실험에서 블랭크홀더력을 변경하면서 스탬핑하여 플렌지부 네 모서리의 최대 주름높이를 Fig.3 의 기구를 이용하여 측정하여 평균값이 1mm 이하로 발생하는 경우를 그 하한으로, 사각 컵의 모서리 벽부위에 그물눈 모양의 국부넙킹이나 크랙이 발생하는 경우를 상한으로 결정하였다. 실험에서는 117cPs 의 고점도유가 사용되었다. 이 결과를 정리한 것이 Table 2 이고 실험한 시편형상의 예를 Fig.9 에 나타내었다. Table 2 에서 CR-1 과 COAT-1 및 COAT-2 강판에 대하여는 18cPs 의 저점도유를 사용하여 성형가능 범위를 구한 결과도 함께 표시하였다. 점도가 작아짐에 따라 BHF 의 상한은 CR-1 과 COAT-2 의 경우에는 2.5ton 정도 떨어지는 데 비하여, COAT-1 강판의 경우에는 7.5ton 이 떨어졌음을 알 수 있다. 이는 CR-1 이나 COAT-2 강판과 비교하여 COAT-1 강판의 경우에는 윤활유 점도 변화에 따라 가공시 마찰저항의 변동이 심하기 때문으로 생각된다. BHF의 하한에 대하여는 CR-1 강판의 경우에 점도 저하에 따라서 2.5ton 이 줄어드는 현상을 볼 수 있다. 이는 윤활유 점도가 낮은 경우에 금형과 강판 간의 마찰이 많이 증가함에 따라 플렌지부의 변형에 대한 구속이 강해졌기 때문으로 보인다. 각 시편의 윤활조건 변경에 따른 마찰계수 변화를 드로비드 (draw-bead) 마찰시험기5) 를 이용하여 측정하여 결과를 Table 3 에 나타내었다. 점도가 낮아짐에 따라 마찰계수는 증가하는 현상을 확인할 수 있으며 이러한 경향은 CR-1 과 COAT-1 및 COAT-2 에서 심하게 나타나고 있다.

Table 2 의 성형한계 범위에 대한 결과에서 하한 BHF 와 상한 BHF 를 각 시편의 특성들로 정리하여 성형 한계에 미치는 시편특성의 영향을 알아보았다. Fig.10 은 시편두께에 따른 하한 BHF 와 상한 BHF 의 관계를 나타내는 것으로 두께 증가

에 따라 하한 BHF 와 상한 BHF가 모두 직선적으로 증가하고 있음을 보여준다. 그러나 시편두께에 따른 상한 BHF 의 증가가 하한 BHF 보다 크므로 두께 증가에 따라 성형가능범위 (상한 BHF 와 하한 BHF 의 차) 가 넓어지고 있다고 볼 수 있다. 앞장에서 살펴본 바와 같이 하한 블랭크홀더력의 경우 원통드로잉과는 다른 결과이다.

Fig.11 은 각각 상한 BHF 와 하한 BHF 에 대한 항복응력의 영향을 나타내었다. 항복응력 증가에 따라 단위두께에 대한 하한 BHF 는 증가하고 상한 BHF 는 급격히 감소한다. 따라서 항복응력의 증가는 성형가능범위를 줄이게 된다. Fig.12 는 가공경화지수의 영향을 보여주는 것으로 가공경화지수가 증가됨에 따라 성형가능범위는 급격히 증가한다. Fig.13 은 상.하한 BHF 와 연신율과의 관계로 연신율의 증가에 따른 성형가능범위 증가도 가공경화지수와 비슷한 경향을 보였다.

## 5. 결 론

각종 냉연강판의 성형가능범위와 주름발생거동에 대한 실험을 블랭크홀더력과 윤활조건을 변경하여 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 냉연강판의 재질과 윤활조건은 강판의 성형가능범위를 결정하는 데 중요한 인자이다.
- 냉연강판의 두께, 연신율, 가공경화지수가 증가됨에 따라 성형 가능범위는 넓어지고 항복응력의 증가에 따라서는 좁아진다.
- 윤활조건은 성형가능범위를 결정하는 중요한 요인이며 도금강판의 경우에 더욱 현저한 영향을 나타낸다.

이상과 같은 강판의 재질과 표면조건에 따른 성형가능 범위에 대한 결과를 이용하여 강판제조사의 품질관리와 냉연강판 수요업체에서 가공시에 사용할 적절한 소재질 판정에 도움이 되리라 생각된다. 특히 강판의 두께와 연신율 또는 항복응력이 가공범위에 어느 정도 영향을 미치는지에 대한 참고자료로 본 연구의 결과가 활용될 수 있을 것이다.

## 6. 참고문헌

1. 장래웅, 최원집, 김영석, 남재복, 배동수, 이찬락, 1990, "자동차용 강판의 성형성 평가시스템개발", 산업과학기술연구소 연구보고서, 과제코드 9036A.
2. 김영석, 최원집, 박기철, 김기수, 김정철, 손원근, 1992, "대형패널의 스탬핑 성형성 평가기법 개발", 산업과학기술연구소 연구보고서, 과제코드 1321B.
3. 박기철, 김영석, 최원집, 1991, "직교배열실험에 의한 스탬핑가공의 영향인자 분석", 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp.104-107.
4. 中川威雄 등 (박승언 등 역), 1988, "프레스가공 데이터북", 기전연구소, 서울.

5. 김영석, 김기수, 1994, "변형모드별 판재의 마찰특성 비교", 한국소성가공학회지, Vol.3, No.1, pp.51-62.

Table 1 Mechanical properties of cold rolled sheet steels used.

specimen	t (mm)	YS (kg/mm <sup>2</sup> )	TS (kg/mm <sup>2</sup> )	U-El (%)	El (%)	n (10-20%)	r
CR-1	0.87	23.3	33.8	-	38.4	0.22	1.39
CR-2	0.70	16.7	30.7	27.6	43.7	0.24	-
CR-3	0.79	16.1	30.3	27.6	44.3	0.24	-
CR-4	0.75	16.9	30.7	-	43.6	0.24	1.61
COAT-1*	0.82	18.3	29.8	25.5	43.3	0.23	-
COAT-2**	0.69	20.5	29.5	25.1	42.1	0.20	-

\* : electro-coated Zn-Fe  
 \*\* : galvaannealed

Table 2 Formable blank holding force range of various sheet steels.

Material	BHF (ton)									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
CR-1	///						■			
CR-2	///					■				
CR-3	///	formable BHF range							■	
CR-4	///						■			
COAT-1	///						■			
COAT-2	///					■				
CR-1 (18cPs)	///						■			
COAT-1(18cPs)	///						■			
COAT-2(18cPs)	///					■				

/// : Flange wrinkling (larger than 1mm) occurred

■ : Drawing wall crack occurred

Table 3 Friction coefficient of sheet at two lubricating conditions.

lub. con. specimen	Lub.oil-1 (117 cPs)	Lub.oil-2 (18 cPs)
CR-1	0.130	0.154
CR-2	0.172	0.184
CR-3	0.188	0.190
COAT-1	0.145	0.164
COAT-2	0.173	0.187

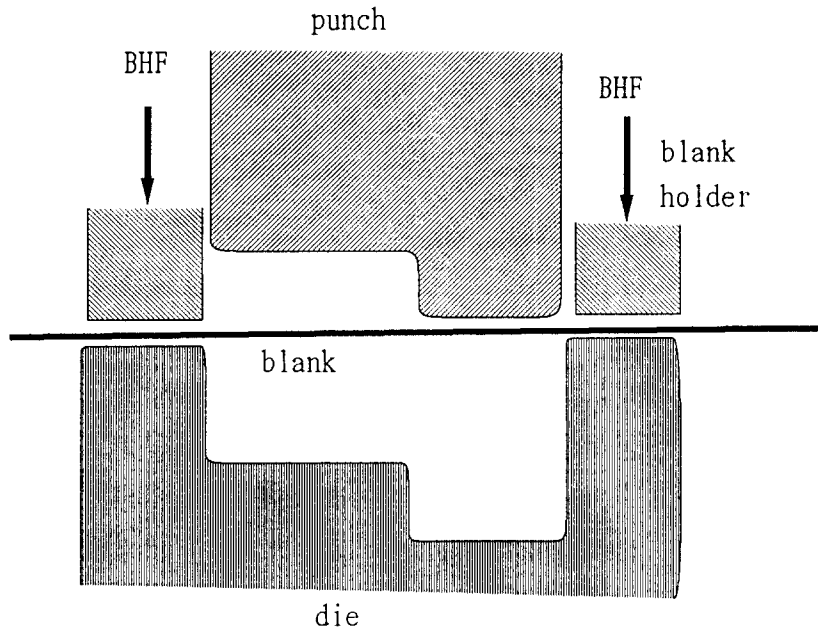


Fig.1 Schematization of sheet metal stamping process.



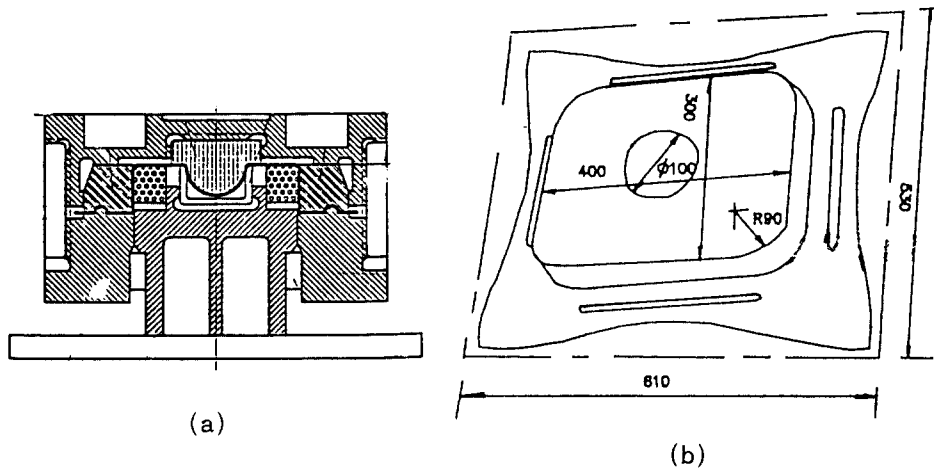


Fig. 2 Model die (a) and formed specimen (b).

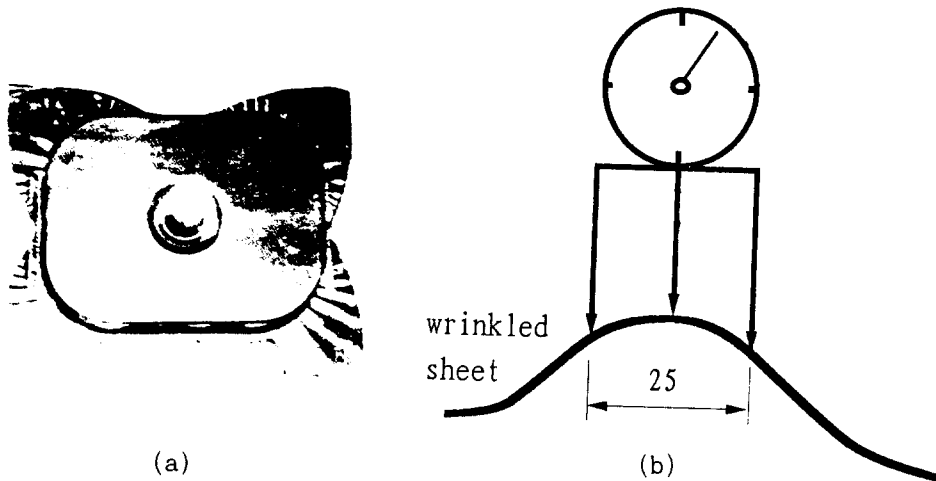


Fig. 3 Stamped specimen with flange wrinkling (a) and apparatus for measuring wrinkling height (b).

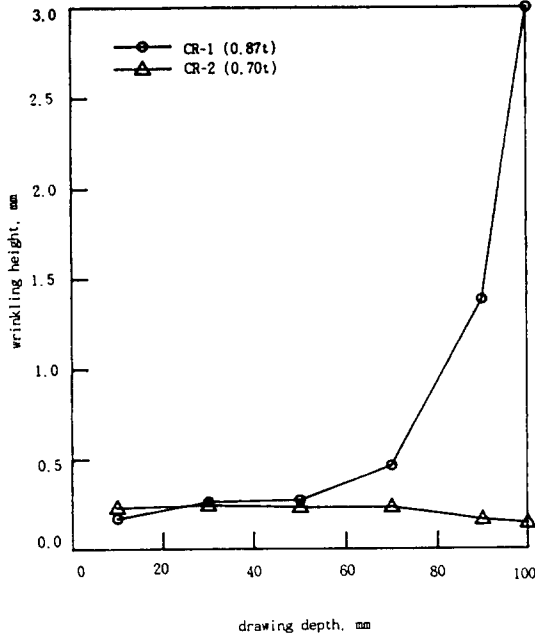


Fig. 4 Wrinkling height evolution at drawing. (BHF = 25ton)

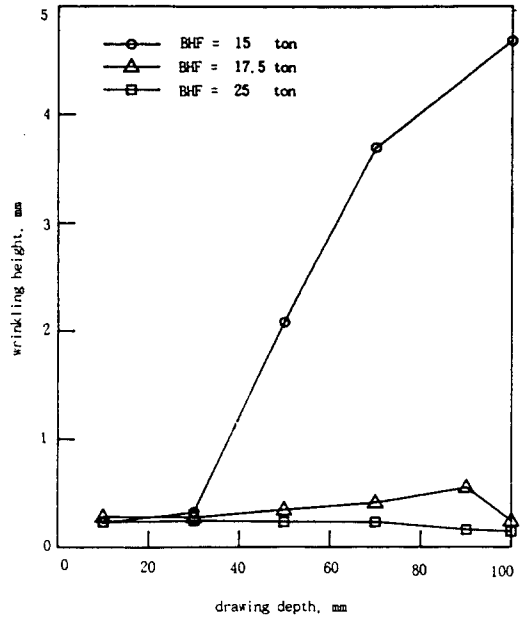


Fig. 5 Wrinkling height evolution at drawing. CR-2(0.7t) specimen is used.

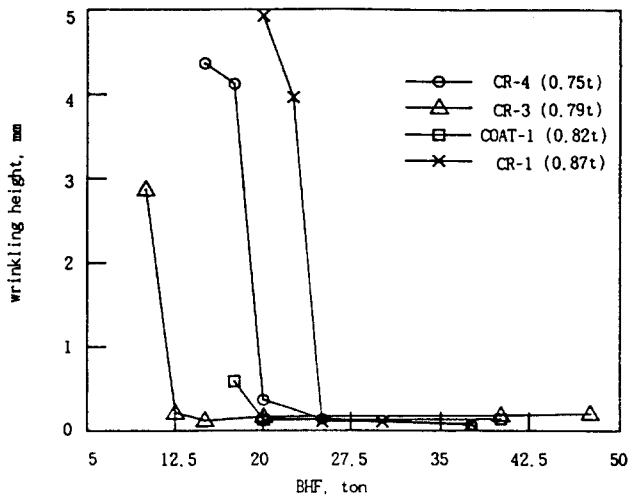


Fig. 6 Flange wrinkling height and BHF.

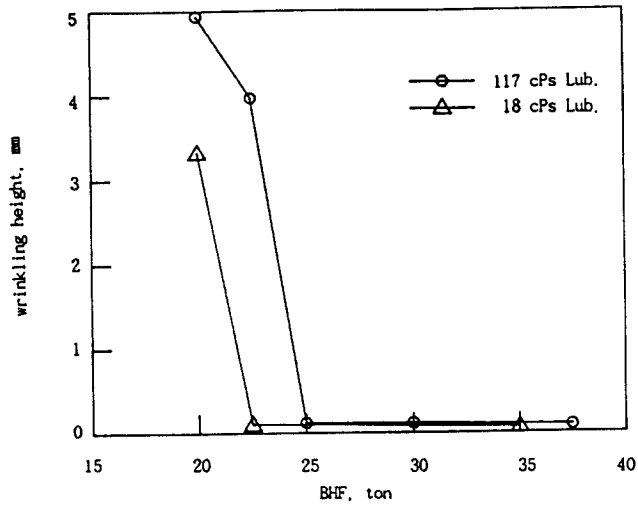


Fig.7 Wrinkling height as lubrication condition.

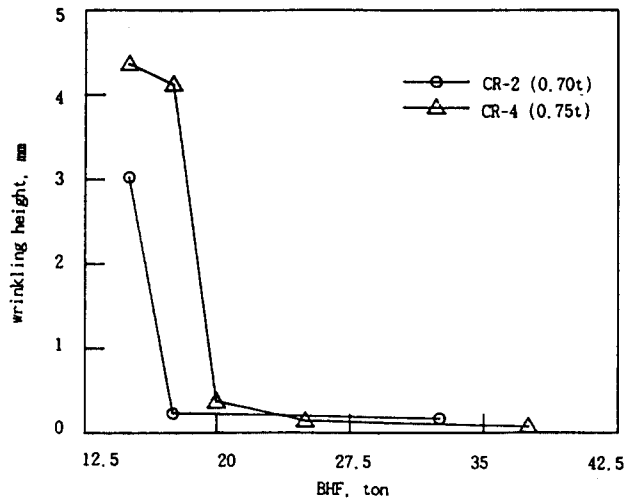


Fig.8 Thickness effect on flange wrinkling.

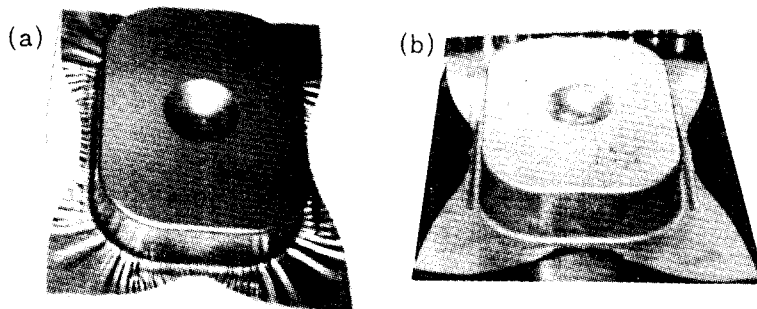


Fig.9 Wrinkling(a) and crack(b) at stamped specimens.

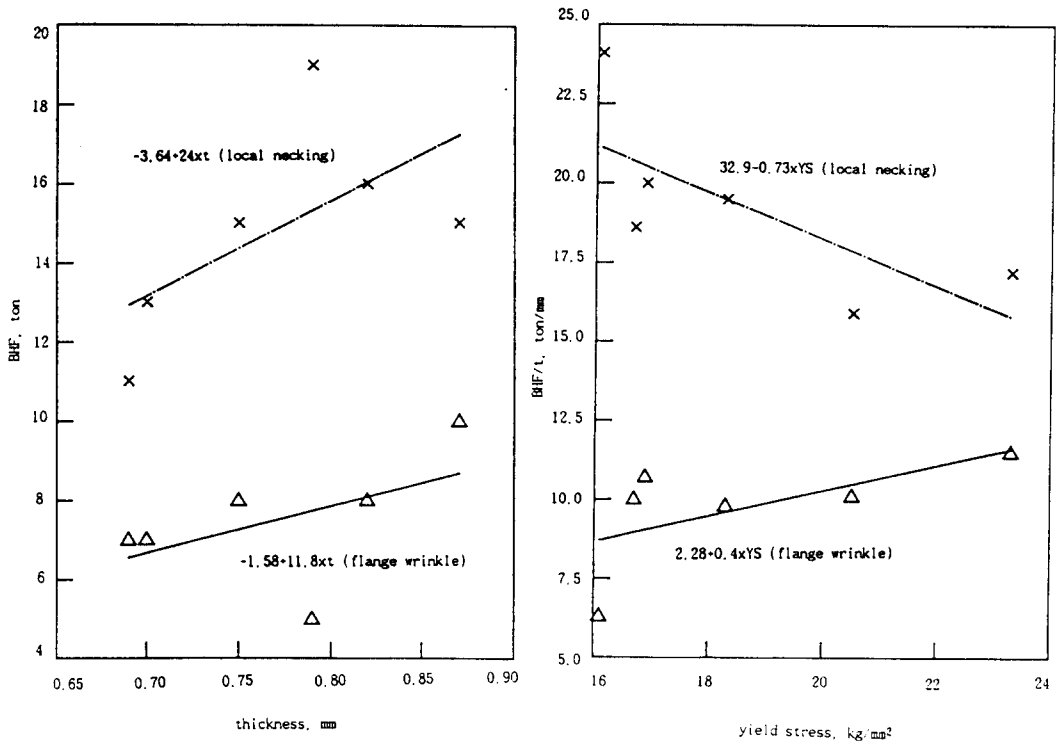


Fig.10 Formable BHF range as thickness. Fig.11 Formable BHF range as yield stress.

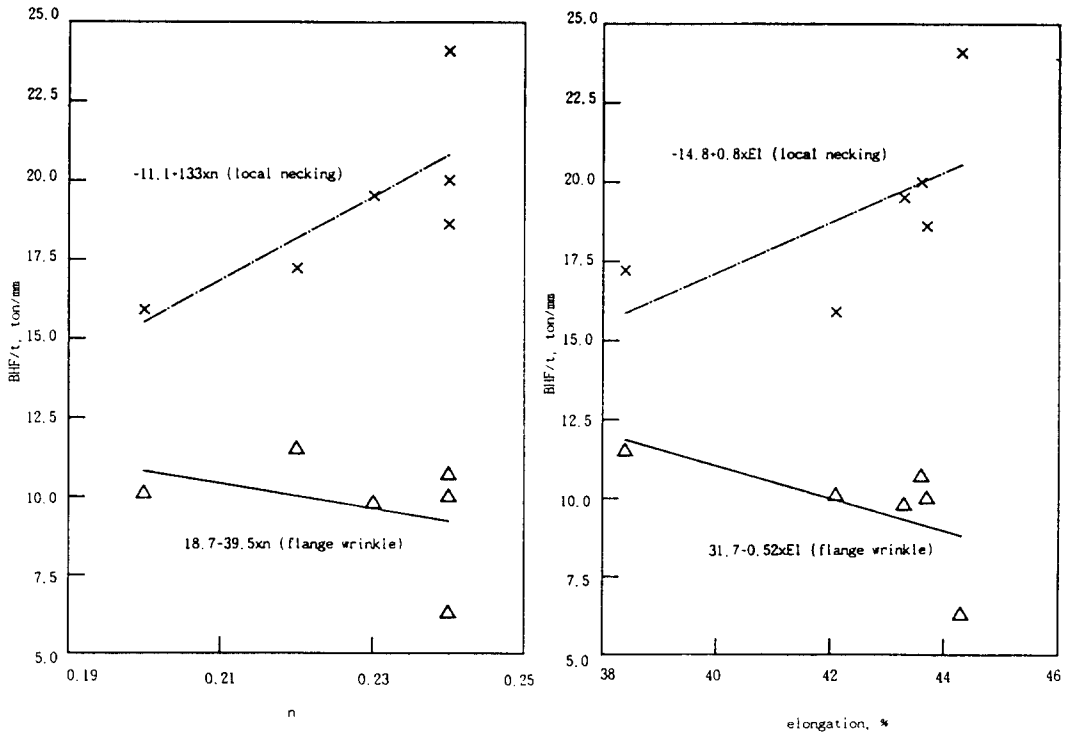


Fig.12 Formable BHF range as hardening index. Fig.13 Formable BHF range as elongation.