

하이드로포밍용 소재의 성형성 평가 연구

한수식* · 박기철*

(2000년 9월 7일 접수)

Development of Formability Test for Tube Hydroforming

S. S. Han and K. C. Park

Abstract

The tube hydroforming technology is new key production technologies, which contribute to a light-weight car. Because the tubes are used for hydroforming instead of the sheet materials formability test for tube is required to measure the formability of materials for hydroforming. In this paper, a kind of formability test for tube, which can well represent the characteristics of tube hydroforming processes, is developed. Developed formability test method can consider not only the influence of material properties but also contact with die and material. Some investigation was carried out to verify the effectiveness of developed formability test.

Key Words : Hydroformability, FLD, Bulge Test, Plain Strain Condition, Friction

1. 서론

최근 들어서 자동차의 연비와 충돌 안정성 향상에 대한 사회적인 요구 증가로 인하여 자동차 생산에 있어서 차체의 무게를 줄이면서 충돌 강도를 향상시킬 수 있는 새로운 부품 가공 방법들에 대한 관심이 증가하고 있다. 그리고 지속적인 자동차사 간의 경쟁 심화는 자동차 생산 비용 절감에 대한 자동차사의 관심을 더욱 증가시키고 있다. 이러한 이유로 인하여 최근 들어서 하이드로포밍(Hydroforming) 기술이 중요한 자동차 부품 가공 기

술의 하나로 많은 관심을 끌고 있다. 일반적으로 하이드로포밍 기술은 성형에 사용되는 소재의 형태에 따라서 튜브 하이드로포밍 (Tube Hydroforming) 기술과 판재 하이드로포밍(Sheet Hydroforming) 기술로 대별되고 있으나 판재 하이드로포밍 기술의 경우 튜브 하이드로포밍 기술에 비하여 대용량의 프레스가 요구되고 그 적용 부품도 튜브 하이드로포밍 기술에 비하여 작기 때문에 아직까지 널리 사용되고 있지 않다. 그래서 일반적으로 하이드로포밍 기술이라 하면 튜브 하이드로포밍을 지칭한다^(1~5).

* 포항제철 기술연구소

하이드로포밍의 원리는 간단하고 오래되었으나 자동차 산업에 본격적으로 적용되기 시작한 지는 오래되지 않았다. 하이드로포밍 기술이 적용되기 시작한 60년대에는 주로 배관용 파이프의 연결용 부품등의 가공에 사용되었다. 그 이후 하이드로포밍 기술은 꾸준히 발전을 이루어 왔으며 하이드로포밍 기술이 갖고 있는 장점들이 부각되면서 유럽의 자동차사를 중심으로 자동차 부품의 양산에 적용되기 시작하였다. 자동차의 부품들에 대하여 점차 경량화, 고강성, 높은 치수 정밀도, 우수한 피로 특성, 우수한 충돌 특성 등을 요구하고 있는 한편, 부품의 원가 절감을 이유로 기존의 생산 방법과 동일한 소재의 사용과 생산 공정의 감소를 요구하고 있다. 하이드로포밍 기술은 자동차 부품의 생산에 적용할 경우 공정수의 단축과 경량화가 가능하기 때문에 저연비 자동차를 개발하려는 자동차 개발 기술자들에게 이상적인 생산 기술로 부각되고 있다. 현재는 자동차의 Instrument panel beam, Radiator support, Engine cradle, Lower arm, Control arm, Exhaust manifold 등과 같은 부품에 대하여 하이드로포밍 기술을 이용하여 양산되고 있거나 부품의 개발이 진행중이다⁽⁶⁻¹¹⁾.

하이드로포밍 기술에 사용되는 소재는 일반 판재 성형 공정의 경우와 달리 강판을 튜브 조관 공정을 통하여 일차 가공한 튜브이다. 일차 가공된 튜브는 다시 유체를 매개체로 하여 부품으로 성형된다. 튜브 조관 공정 중에 갖는 가공 경화량에 따라서 조관 후 튜브의 특성이 달라지기 때문에 성형시 고려하여야 할 점이 기존의 판재 성형 방법과는 많이 다르다. 특히 사용 소재가 튜브이기 때문에 튜브가 하이드로포밍에 얼마나 적합한가하는 것을 평가하는 것은 매우 어렵고도 중요하다. 기존의 판재 성형 공정에 적용되는 성형성 평가법은 하이드로포밍에 대한 소재의 평가법으로 적당하지 않기 때문에 튜브 벌지 시험(Tube Bulge Test)과 같은 방법들이 튜브의 하이드로포밍성 평가에 사용되고 있다. 본 연구에서는 튜브의 하이드로포밍 특성을 평가함에 있어 하이드로포밍 조건과 유사한 응력 조건에서 하이드로포밍성을 평가할 수 있는 방법을 제안하고 그 방법의 특성을 살펴보았다.

2. 하이드로포밍 기술

2.1 하이드로포밍 기술의 개요

튜브 하이드로포밍 기술은 고압의 압력 매체를 이용한 튜브 성형 기술이다. 소재를 금형의 공동부에 장착하고 튜브의 내부에 물이나 기름같은 비압축성 압력 매체를 채우고 적당한 기구를 사용하여 밀폐한 후에 압력 매체

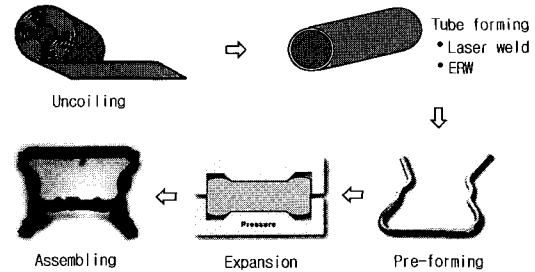


Fig. 1 Hydroforming procedure

에 성형 압력을 가하여 소재를 원하는 형상으로 소성 가공하는 것이 하이드로포밍의 기본이다. 하이드로포밍 공정중 소재에 작용하는 응력 상태는 압력 매체의 압력으로 인하여 원주 방향으로 인장 응력이 작용하며 축 방향으로의 소재 유입(Axial Feeding)에 의하여 길이 방향으로의 압축 응력이 작용하는 경우가 있다. 그러나 성형은 주로 원주 방향으로의 인장 응력에 의하여 지배적으로 발생한다. 하이드로포밍 사이클은 각 적용 부품과 기술에 따라서 차이가 있으나 Fig. 1에 나타난 것과 같은 전형적인 공정 순서를 보인다. 판재에서 조관된 튜브는 먼저 요구되는 형태로 튜브 굽힘 공정에서 굽힘 성형되거나 금형을 이용하여 예비 성형된다. 이때 튜브의 용접선이 과도한 변형을 받지 않도록 위치에 주의한다. 예비 성형 제품은 밀폐 금형의 공동부에 장착되며 튜브의 양단으로부터 튜브 내부에 압력 매체를 넣은 다음 적절하게 고안된 장치를 이용하여 밀봉되고 고압이 작용하여 원하는 제품으로 성형한다. 이때 성형 제품의 형상과 성형 정도에 따라서 축 방향으로의 소재 공급을 작용하는 경우도 있다. 고압 상태에서 성형 제품이 금형의 공동부를 완전히 채우고 난 후에는 부품 조립을 위한 천공 작업을 수행하기도 한다.

2.2 하이드로포밍용 소재

하이드로포밍 기술이 자동차 부품 제조에 많이 적용되고는 있으나 아직도 개발중인 기술이기 때문에 소재의 요구 특성에 대하여서 잘 알려져 있지 않다. 기본적으로 하이드로포밍시 소재의 변형 특성이 판재의 일반 신장 성형의 그것과 유사하기 때문에 소재로서 요구되는 특성은 판재의 신장 성형시 요구되는 특성과 매우 유사하다. 연신율과 가공 경화 지수가 높은 소재가 하이드로포밍용 소재로서 적당한 것으로 알려져 있다. 특히 하이드로포

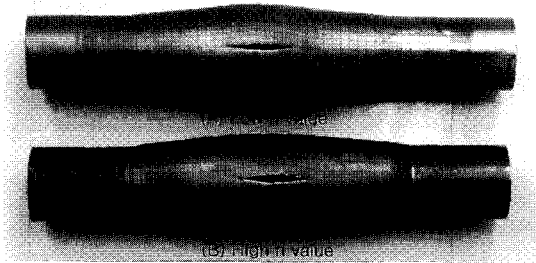


Fig. 2 Influence of n value on deformed shape

밍의 경우 성형 특성상 변형 집중이 일어나기 쉽기 때문에 변형을 균일화시키는데 중요한 역할을 하는 가공 경화 지수가 하이드로포밍용 소재의 주요 요구 조건으로 알려져 있다. Fig. 2 는 가공 경화 지수가 다른 두 종류의 튜브를 벌지 시험하였을 때의 변형 형상을 나타낸 것이다. 두 재료의 경우 연신율은 거의 유사하기 때문에 터짐 발생 시점까지의 확관비는 유사하게 나타났지만 가공 경화 지수의 차이로 인하여 변형 형상이 서로 다르게 나타났다. 가공 경화 지수가 큰 튜브가 보다 균일하게 변형되었으며 가공 경화 지수가 작은 튜브의 경우 변형이 튜브의 가운데 쪽에만 집중되어 발생하였다.

하이드로포밍용으로 사용되는 튜브는 주로 ERW 용접 프로세스를 거쳐서 생산되는 것들이 대부분이다. 유럽 일부에서는 레이저 용접된 튜브를 하이드로포밍에 사용하는 경우도 있지만 레이저 용접 튜브의 생산성이 ERW 튜브에 비하여 낮기 때문에 특수한 경우에만 사용되는 것으로 알려져 있다. Fig. 3 에는 ERW 튜브에 대하여 위치별 경도와 두께의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 튜브의 경우 용접선 부위를 고려하지 않더라도 원주 방향에 대하여 물성치가 균일하지 않음을 알 수 있다. 이것은 ERW 튜브 조관중 튜브의 원주 방향

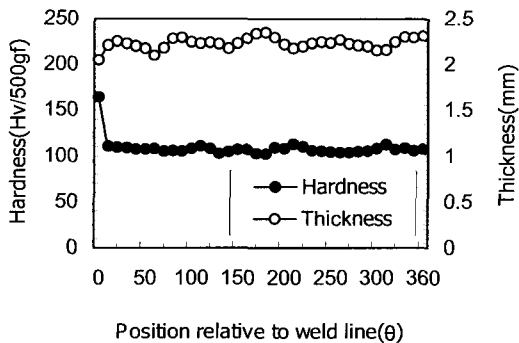


Fig. 3 Material properties of ERW tube

각 부위의 소재들이 겪는 변형 경로가 다르기 때문이다. 일부는 단순히 한 방향으로 굽힘 변형을 받는 것에 반하여 다른 일부는 굽힘과 되굽힘 등을 받기도 한다. 용접부의 두께는 일반적으로 모재의 그것에 비하여 얇다. 그 이유는 용접 후에 용접부의 두께가 두꺼워지는데 이렇게 두꺼워진 여유를 제거하는 과정에서 사용되는 튜브 내부에 위치한 여유 제거용 전단날의 직경이 튜브의 내경보다 작기 때문이다. 튜브에 있어서 용접 부위가 다른 부위에 비하여 두께가 얇은 정도에 비하여 강도가 다른 부위에 비하여 매우 높고 하이드로포밍시 용접부를 변형이 최소화되는 부위에 위치시키기 때문에 용접부에서 파단이 일어나는 경우는 거의 없다.

3. 하이드로포밍성 시험법

3.1 기존 하이드로포밍성 시험법

전술한 바와 같이 하이드로포밍에 사용되는 소재는 튜브 소재로서 튜브는 판재를 롤 성형한 후 용접하여 생산되기 때문에 튜브로 조관하는 과정에서 판재는 가공 경화를 겪게 되며 이로 인하여 튜브의 물성치는 원소재인 판재의 그것과 매우 다르게 나타난다. 따라서 소재의 하이드로포밍에 대한 적합성 평가는 판재 상태에서 서가 아닌 튜브 상태에서 이루어져야 한다. 다른 의미에서 보더라도 하이드로포밍에 사용될 튜브 소재가 갖고 있는 성형성을 평가하는 것은 매우 중요하다. 튜브가 갖고 있는 하이드로포밍성을 적절하게 평가함으로써 하이드로포밍 부품 제작에 사용될 소재 선정에 유용할 뿐만 아니라 개발된 소재간의 우열을 평가할 수 있게 되어 적절한 하이드로포밍용 소재의 개발이 가능하기 때문이다. 내압을 받고 있는 상태의 튜브의 응력 상태는 박막 응력 상태이며 소재의 소성 변형을 직접 일으키는 응력은 원주 방향과 길이 방향의 응력이다. 실제 이러한 응력 조건은 굽힘의 구속이 영향을 미치지 않는 곳에서만 극히 제한적으로 나타날 수 있고 거의 대부분의 경우 굽힘과 소재의 접촉이 일어나고 이로 인하여 굽힘의 효과가 동시에 작용하는 쉘 응력 상태에서 의해서 소재의 소성 변형이 일어난다. 따라서 튜브 소재의 하이드로포밍성을 적절하게 평가하기 위해서는 이러한 응력 상태를 올바르게 모사할 수 있는 시험법을 사용하여야 한다. 일반적으로 튜브의 하이드로포밍성을 평가하는 방법으로서 사용되고 있는 것은 벌지 시험이다. 이 방법 튜브의 양단을 잘 밀봉시키고 터짐이 발생할 때까지 내부에 고압을 가한 다음 초기 직경에 대하여 터짐이 일어난 후의 직경의 비 즉 확관비를 이용하여서 튜브의 하이드

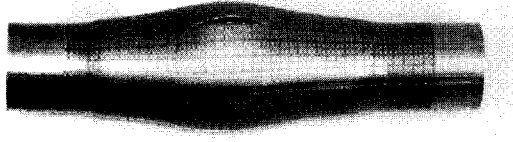


Fig. 4 Deformed shape of tube after bulge test

로포밍성을 평가하는 방법이다. Fig.4 는 벌지 시험을 통하여서 튜브의 확장 시험을 수행한 예를 나타낸 것이다. 이 경우 파단은 항상 튜브의 용접부나 열영향부가 아닌 모재에서 발생하였으며 튜브 조관 공정중 여러 가지 이유로 인하여 두께가 얇아졌거나 강도가 약해진 부분에서 파단이 일어났다. 이 시험 방법은 시험법이 간단하고 성형 시험 결과의 정량화가 용이하다는 특징이 있다. 시험시 축 방향으로의 재료의 이동을 구속하기가 어렵기 때문에 시험중 축 방향으로의 재료의 유입이 일어나서 파단 부위의 변형량은 FLD상의 왼쪽에 치우쳐 있다. 파단 부위의 부 변형량은 재료의 확장률이 커질수록 FLD상의 왼쪽에 치우치는 정도가 크다. 그러나 시험에 사용되는 튜브의 길이는 시험 결과에 대하여 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이것은 시험법의 다른 요구 조건의 하나인 소재의 물성치 외적인 인자에 대하여 시험 결과가 독립적으로 일어날 필요 조건을 만족하고 있음을 알 수 있다. 벌지 시험은 튜브를 박막 응력 상태에서 시험하는 방법으로서 실 하이드로 포밍에서의 쉘 응력 상태와 차이가 있다. 하이드로포밍에 있어

서 높은 성형성을 갖는 소재가 요구될 경우 튜브의 조관시에 발생한 가공 경화를 제거하기 위하여 아닐링 처리를 수행한다. Table 1 에 나타난 바와 같이 아닐링 처리한 튜브의 경우 모재의 인장 특성이 다른 소재에 비하여 우수함에 불구하고 다른 소재에 대해 벌지 시험 결과가 만족스럽지 못하게 나타나는 경우가 있다. 이것은 튜브를 아닐링 처리할 경우 용접부의 물성치가 모재의 것과 유사하게 되어 벌지 시험시 상대적으로 두께가 얇은 용접부에서 파단이 발생하기 때문이다. 따라서 아닐링 처리한 소재에 대하여 벌지 시험으로 소재의 하이드로포밍성을 평가할 경우 모재가 갖고 있는 하이드로포밍성을 적절하게 평가할 수 없는 경우가 발생한다. 일반적으로 하이드로포밍에 있어서 용접부의 위치를 변형량이 가장 작은 부위에 위치하게 하기 때문에 하이드로포밍시 파단이 발생하는 경우는 거의 없다. 따라서 적절한 튜브의 하이드로포밍성 평가 방법은 튜브의 용접부의 물성치 영향을 무시할 수 있는 방법이어야 한다. 하이드로포밍시 소재와 금형은 상당히 높은 압력 상태에서 접촉이 이루어지며 이러한 높은 접촉 압력하에서 상대 운동을 일으킨다. 이때 일어나는 마찰 상태는 단조와 같은 체적 성형의 그것과 유사하며 소재의 표면 상태에 따라서 그 성질은 달라진다. 벌지 시험의 경우 이러한 튜브 소재와 금형의 접촉을 고려할 수 없는 문제점이 있다.

이러한 벌지 시험법의 단점들을 보완하여 금형과의 접촉을 함께 고려하면서 용접부 물성치의 영향을 배제할 수 있는 하이드로포밍성 평가법으로서 T자 형상과

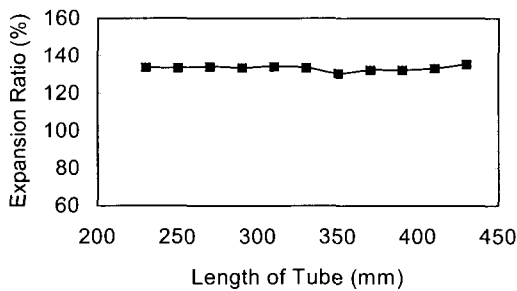
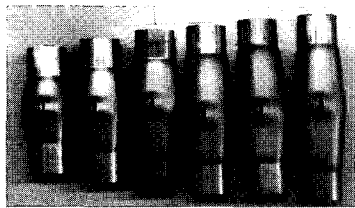


Fig. 5 Influence of tube length on bulge test results

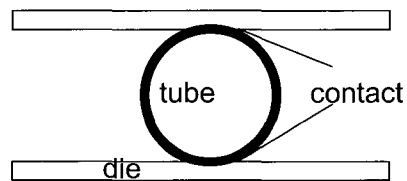


Fig. 6 Schematic diagram of developed hydroformability test

사각 튜브 성형 시험법 등이 제안되어 사용되고 있다. 이들 시험법은 시험 중 튜브의 양쪽을 금형내로 유입시키면서 성형하여 터짐이 발생할 때까지 성형하는 것이다. T자 형상 시험의 경우 시험 후 T자 부분의 높이로 소재의 성형성을 나타낸다. 이 방법은 평가 결과에 금형과 소재와의 마찰 특성이 잘 고려될 수 있는 장점이 있다. 동일한 소재의 경우라도 표면 처리 특성에 따라 마찰 특성이 달라지며 소재의 마찰 특성이 우수할수

Table 1 Bulge test result for various materials

	YP (kgf/mm ²)	EL (%)	n	Expansion		Remark
				Ratio (%)		
1	39.95	25.89	0.150	31		
2	26.07	43.82	0.240	37	Annealing	
3	24.77	49.88	0.189	35		
4	27.74	37.32	0.201	41		
5	30.34	39.06	0.157	34		

록 금형 내에서의 재료의 이동이 용이하여 우수한 성형성을 나타낸다. T 자 형상 성형에 대하여 성형 특성을 살펴보면 성형 중 튜브는 축 방향의 재료 유입에 의하여 금형의 내부로 유입되고 가운데 부분에서는 벌짐이 일어나 두께의 감소가 일어난다. 그러나 축 방향으로의 재료 유입에 의하여 가운데 부분의 두께 감소량이 영향을 받는다. 그 외 부분의 재료들은 금형과의 접촉 상태에서 많은 거리를 이동하게 되나 실제 변형량은 별로 크지 않다. 이 방법은 시험을 위한 적절한 내압과 튜브의 축방향 유입과의 상관 관계를 도출하는 것이 매우 어렵고 이들 관계에 따라서 동일한 재료에 대하여서도 서로 다른 성형성을 나타내는 경우가 많아서 소재의 성형성을 평가하기는 곤란한 문제점이 있다. 사각 튜브 성형 시험법은 사각 단면을 갖는 금형의 내부에서 튜브를 확관시킴으로써 튜브의 성형성을 평가하는 방법이다. 이 방법은 하이드로포밍시 중요한 성형 특성의 하나인 금형 코너 부분에서의 국부적인 두께 감소 현상을 잘 예측할 수 있으며 성형 시험 중 발생하는 금형과의 접촉에 대하여서도 잘 고려할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 성형 시험 결과의 정량화가 어렵고 T자 형상 성형과 마찬가지로 적절한 성형 조건을 설정하기가 어렵다.

3.2 평판형 성형 시험법

기존의 튜브 소재에 대한 하이드로포밍성 시험법들이 갖고 있던 문제점들을 보완하고 이들의 장점을 고려할 수 있는 시험법으로서 평판형 하이드로포밍성 시험법을 제안하였다. 이 시험법은 Fig. 6 과 같이 튜브의 외부 직경과 동일한 간극을 갖고 나란하게 있는 두 개의 평판 사이에서 튜브를 확관하는 방법이다. 이 시험법은 튜브의 내부에 압력 매체에 고압을 작용하여 터짐을 일

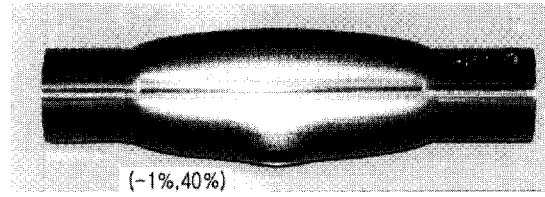


Fig. 7 Deformed shape of tube after developed formability test

으키고 터짐이 일어난 후 직경과 초기의 튜브의 직경의 비를 이용하여 튜브가 갖는 성형성을 평가하는 방법이다. 튜브의 내부에 압력을 가하여서 터짐이 발생할 때까지의 직경비를 측정한다는 면에서 벌지 시험과 유사하나 시험 중 튜브의 일부가 금형과 접촉하여 상대 운동을 일으키기 때문에 금형과의 접촉을 고려할 수 있다는 점에서 튜브 벌지 시험법과는 구분되어지며 시험에 사용되는 튜브의 길이에 무관하게 성형 시험 결과가 나타난다는 면에서 벌지 시험법이 갖는 장점을 그대로 갖고 있다. 이 시험 방법은 금형과의 접촉 부분이 마찰 저항으로 인하여 거의 변형이 일어나지 않기 때문에 시험중 금형과의 접촉면에 튜브의 용접선을 위치하게 함으로써 조건 후 아닐링 처리 등에 의하여서 용접부가 다른 부분에 비하여 약화되었다 하더라도 이 부분에서 파단이 일어나는 것을 방지할 수 있어 모재가 갖는 하이드로포밍성을 평가할 수 있는 장점이 있다. 벌지 시험의 경우 시험 중 발생하는 축 방향의 소재 유입이 본 시험법의 경우 금형과의 접촉에 의하여 구속되기 때문에 파단 발생 부위의 변형 상태가 평면 변형 상태에 놓이게 된다. 이것은 Fig. 8 과같이 실제 하이드로포밍에서도 파단이 평면 변형 조건에서 주로 발생하는 것을 고려하여 볼 때 평면 변형 파단 조건 모사는 본 시험법의 유용성을 말해주고 있다. 벌지 시험법과 본 시험법의 특성을 비교

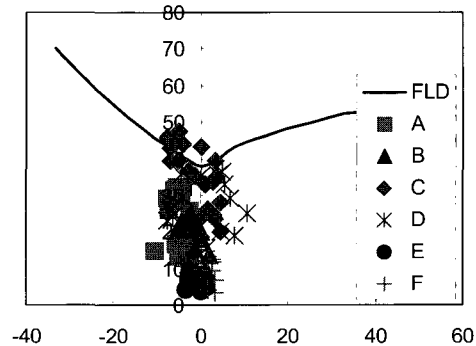


Fig. 8 Strain distribution of hydroformed part

Table 2 Hydroformability test results

Material	Tube OD	Thickness	Test Type	Lubricant	Expansion Ratio
SPCEN	2.5"	1.4	Bulge Test	-	47.2%
			Developed	-	27.8%
			Developed	Rust Prevent Oil	27.8%
			Developed	Drawing Oil A	29.0%
			Developed	Drawing Oil B	28.4%
			Developed	Drawing Oil C	30.3%

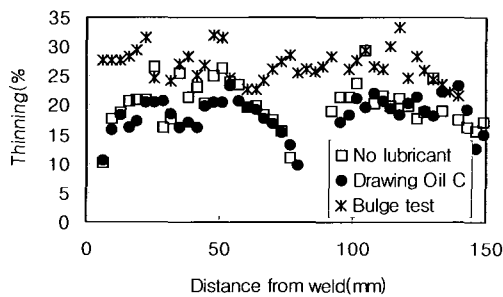


Fig. 9 Thickness strain distribution along the circumferential direction after formability test

분석하기 위하여 몇 가지 서로 다른 윤활 조건에 대하여 성형성 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 소재의 물성치와 시험 조건 그리고 시험 결과를 Table. 2 에 나타내었다. Table 2 의 시험 결과에서 알 수 있듯이 평판형 성형 시험시 금형과의 접촉에 의하여 재료의 유동이 구속되어 확판비가 벌지 시험에 비하여 매우 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 평판형 시험의 경우 금형과 소재와의 접촉을 고려할 수 있기 때문에 윤활 조건이 서로 달라지면 금형과의 접촉면에서의 유동 저항이 달라져서 확판비가 달라진다. Fig. 9 은 벌지 시험한 튜브와 평판형 성형 시험한 튜브의 원주 방향으로의 두께 변형률 분포를 나타낸 것이다. 벌지 시험의 경우 두께 변형률 분포가 원주 방향으로 비교적 균일한 분포를 갖지만 튜브가 갖고 있는 재료의 불균일성으로 인하여 초기에 예상했던 완전히 균일한 분포는 나타나지 않았다. 평판형 성형 시험의 경우 금형과의 접촉면에서의 두께 변형률과 비접촉 면에서의 변형률 분포는 매우 큰 차이를 나타내고 있다. 그리고 금형과의 접촉면의 마찰 특성이 우수한 경우 두께 변형률 분포가 보다 균일하여지는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 하이드로포밍용 튜브 소재의 성형성을 평가하는 방법으로서 제안된 평판형 금형을 이용하여 벌지 시험을 수행하는 평판형 성형 시험법이 하이드로포밍 공

정에서 발생하는 금형과 소재의 접촉에서 발생하는 마찰 특성의 영향을 고려할 수 있고 평면 변형 과단 조건을 잘 모사할 수 있어 튜브의 하이드로포밍성을 평가하는 적절한 시험법으로 판단되었다. 향후 본 시험법을 사용할 경우 튜브 소재의 하이드로포밍에 대한 적합성 평가 뿐만 아니라 개발된 신 소재에 대하여서도 기존 소재와 비교하여 어느 정도 하이드로포밍성이 우수한지를 평가할 수 있으므로 소재간의 우열을 평가하는 수단으로 잘 활용될 수 있으리라 판단된다.

4. 결론

튜브 소재에 대한 하이드로포밍성을 평가하는 평가법을 제안하고 이들에 관하여 성형 실험해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 튜브 자유 벌지 시험을 이용하여 튜브 소재의 하이드로포밍성을 평가하는 방법은 시험이 매우 용이하고 정량화가 용이한 장점이 있지만 실 성형에서의 중요한 인자의 하나인 금형과의 접촉을 고려할 수 없다는 점과 용접부 특성이 시험 결과에 크게 영향을 준다는 문제점을 갖고 있다.

(2) 하이드로포밍 공정에 있어서 과단 발생은 판재 성형의 경우와 마찬가지로 평면 변형 상태에서 주로 발생하기 때문에 튜브 소재의 하이드로포밍성을 적절하게 평가하기 위해서는 평면 변형 과단 조건을 잘 모사할 수 있는 시험법을 사용하여야 한다.

(3) 평판형 성형 시험법은 튜브 자유 벌지 시험법에 금형의 접촉을 고려할 수 있게 고안된 방법으로서 금형과의 접촉 고려와 용접부의 영향을 배제할 수 있으며 정량화가 용이하기 때문에 튜브의 하이드로포밍성 평가 방법으로 적합한 것임을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Wilson, W.R.D., Hsu, T.C, 1993, "An Analysis of the Hemispherical-Punch Hydroforming Processes", J. of Materials Processing Technology, Vol.37, (1-4), pp. 225~239.
- (2) Christensen, W.L., 1995, "Hydroforming of tubular sections", Metal Forming, Vol.29, No.10, pp.36~43
- (3) Ni, C.M., 1994, "Stamping and hydroforming process simulations with a 3D finite element code", SAE Transactions: J. of Materials & Manufacturing, Vol.103, pp. 512~534.

- (4) Dohmann, F., Hartl, Ch., 1996, "Hydroforming - a method to manufacture light weight parts", J. of Materials Processing Technology, Vol.60, (1-4), pp.669~676.
- (5) Trefzer, H., 1997, "Beyond the hydroforming buzzword", The Tube & Pipe Journal, Vol.8, (2), pp. 49~51.
- (6) Zotkovich, C.M., 1997, "The hydroforming alternative", The Tube & Pipe Journal, Vol.8, pp. 71~74.
- (7) Weimer, G.A., 1997, "The hot topic of tube hydroforming", The Tube & Pipe Journal, Vol.8, pp. 77~80.
- (8) Mason, M., 1996, "Hydroforming of high strength steel tubes for body and frame applications", 29th International Symposium on Automotive Technology and Automation. Vol. I
- (9) Chang, D.I., Nees R., Morin M., 1996, "Application of hydroforming technology for exhaust manifolds", SAE Transactions: J. of Materials & Manufacturing, Vol.105, (5), pp. 713~718.
- (10) Dohmann, F., Hartl Ch., 1997, "Tube hydroforming-research and practical application", J. of Materials Processing Technology, Vol.71, (1), pp. 174~186.
- (11) Fairley, G.T., 1997, "Controlling critical tubing characteristics for hydroforming", The Tube & Pipe Journal, Vol.8, (6), pp. 72~76.