

액체로켓 연소기용 구리합금의 성형한계성 평가

류철성* · 최환석*

Forming Limit Evaluation of Copper Alloy for Liquid Rocket Combustion Chamber

Chul-Sung Ryu* · Hwan-Seok Choi*

ABSTRACT

The dome stretching and tension test have been made to obtain a forming limit curve(FLC) for the copper alloy which is used for manufacturing the regenerative cooling chamber. For experimental survey of the forming limit curve, we have used in-plane tension specimen to obtain tension-compression strain state and also out of plane specimen to obtain tension-tension strain state through dome stretching test. All specimens are divided into longitudinal and radial direction specimens by the manufacturing method. The test results shows that in tension-tension region, copper alloy possesses a maximum major strain of 62.3% and maximum minor strain of 58.6%. In the tension-compression region, maximum major strain is 60.5% and maximum minor strain is 25.8%.

초 록

액체로켓 연소기 재생냉각 챔버의 제작에 사용되는 구리합금의 성형한계 곡선을 얻기 위하여 돔 장출 시험과 인장시험을 수행하였다. 성형한계 곡선에 대한 실험적인 연구를 위하여 인장시편을 사용하여 인장-압축 변형률 상태의 데이터를 얻었으며, 인장-인장의 변형률 상태를 얻기 위하여 돔 장출 시험용 시편을 사용한 돔 장출 시험 또한 수행하였다. 시험에 사용한 모든 시편은 제작방법에 따라 종 방향과 횡 방향시편으로 구분하였다. 시험 결과 인장-인장 변형률 상태에서 최대 주 변형률과 부 변형률은 62.3%와 58.6%이며 인장-압축 상태에서는 60.5%와 25.8%로 나타났다.

Key Words: Regenerative Cooling Chamber(재생냉각 챔버), Copper Alloy(구리 합금), Forming Limit Diagram(성형한계도), Dome Stretching Test(돔 장출 시험)

1. 서 론

액체로켓 연소기 재생냉각 챔버(regenerative cooling chamber)의 노즐을 벌징(bulging) 공정을 적용하여 제작할 때 벌징되는 노즐의 확대비를 어느 정도까지 설계해야 재료가 네킹이 발생하지 않고 벌징을 성공적으로 수행할 수 있을지

* 한국항공우주연구원 연소기팀
연락처, E-mail: csryu@kari.re.kr

예측하는 것은 매우 중요하다. 별징 공정이 적용되는 재생냉각 챔버에서 내측 구조물은 두께가 얇은 냉각 핀 형상의 리브(rib) 있는 형태이다. 별징 공정은 Fig. 1에서 좌측의 형상처럼 내측구조물을 외측구조물에 조립할 수 있는 형상으로 설계하고, 외피구조물과 조립한 후, 내측구조물을 노즐 형상으로 변형시키는 공정이다. 본 연구는 내측구조물을 노즐 형상으로 변형시키는 별징 공정을 수행할 때 내측구조물에 네킹이 발생되지 않도록 구리합금의 성형한계성 평가에 관한 것이다.

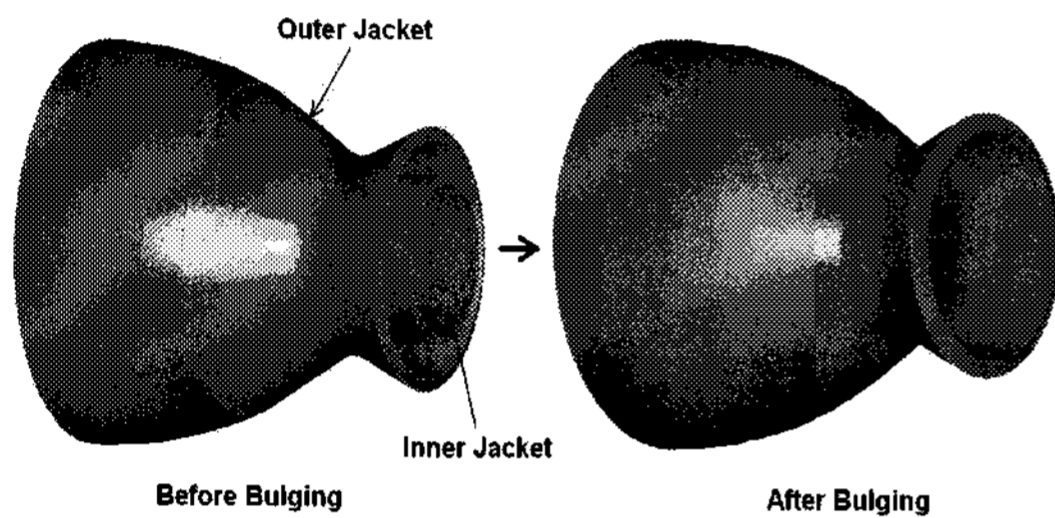


Fig. 1 Configuration of bulging method

2. 시험 절차

2.1 재료 및 장비

연소기 재생냉각 챔버 내측구조물에 사용되는 재료는 크롬이 함유된 구리합금이다. 이 재료의 성형한계도(forming limit diagram)를 얻기 위하여 사용한 돔 장출 시험(dome stretching test) 장비는 USTM(Universal Sheet Metal Forming Test Machine)이다. 이 장비의 최대 하중 능력은 200 kN이며, 블랭크 홀더의 최대 힘은 300 kN이다. 펀칭 스트로크는 150 mm이며, 블랭크 홀딩 스트로크는 250 mm이고, 펀치의 최대 속도는 700 mm/min이다.

2.2 시험 절차

본 연구에서 사용한 돔 장출 시험은 오하이오 주립 대(Ohio State University)[1]에서 제안한 직경이 101.6 mm인 반구형의 펀치를 이용하여 수행하였다. 인장시험은 인장시험용 시편[2]을 제

작하여 인장 시험기를 사용하여 수행하였다. Fig. 2에 돔 장출 시험에 사용한 치구의 형상을 나타내었다.

돔 장출 시험은 먼저 가공 완료된 시편을 다이(die)의 표면에 올려놓고 블랭크 홀더(blank holder)를 이용하여 20 kN의 힘으로 시편을 눌러 고정시킨다. 모든 시편에는 변형 후 상태를 측정하기 위하여 2.5×2.5 mm 크기의 사각형 그리드(grid)를 만들었다. 이 그리드 패턴은 실크스 크린 인쇄(silk printing) 방법으로 시편의 한쪽면에 프린트하였다. 시편을 고정한 후 돔을 유압 장치를 이용하여 상부로 밀어 올린다. 돔 장출 시험에서 돔의 프레스링은 시편에 네킹 또는 크랙이 발생되면 시험을 중단한다. 시편에 프린트된 정사각형의 그리드는 변형에 의하여 직사각형 형상으로 변화된다. 시험이 완료된 각각의 시편에 대하여 네킹이 발생한 영역과 그 주변에 있는 변화된 그리드 형상에서 주 변형률(major strain)과 부 변형률(minor strain)을 측정한다. 본 연구에서는 돔 장출 시험 및 인장시험용 시편 두 가지를 제작하여 시험을 수행하였다. 변형률 측정에는 그리드 패턴 분석기(grid pattern analyzer)를 사용하였다. 2축 인장 모드(balanced biaxial tension mode)의 변형률 상태를 얻기 위하여 폭 170 mm의 시편에서 두께 2.0 mm의 우레탄과 그리스를 이용하여 돔과의 마찰을 감소시켜 시험을 수행하였다. 이 시편에서 윤활제를 사용하면 마찰력이 감소하여 더 높은 변형률에

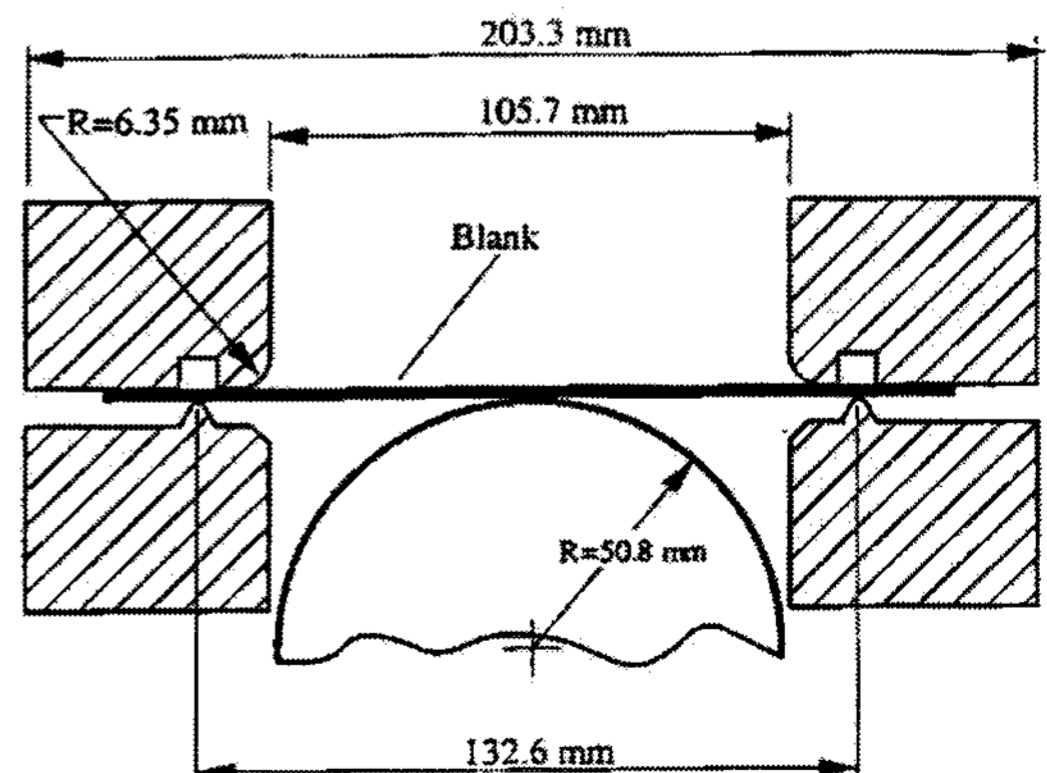


Fig. 2 Configuration of dome stretching test tools

서 네킹이 발생하고 2축 인장의 상태의 변형률이 발생된다.

3. 결과 및 검토

성형한계 곡선(forming limit curve)은 판재가 변형되어 국부 네킹(localized necking)이 발생하는 상태를 의미한다. 따라서 성형한계도에서 성형한계 곡선보다 상부에 있는 모든 변형률 상태는 판재가 파손됨을 나타내며, 하부의 변형률 상태는 판재가 네킹 또는 파손이 발생하지 않음을 나타낸다. 본 연구에서 시험에 사용할 시편의 제작은 두 가지 방법으로 제작하였다. 액체로켓 연속기의 재생냉각 챔버로 사용되는 구리합금은 봉재의 형상으로 생산되고, 실린더 형상으로 가공된다. 이 구리합금 봉재를 와이어 커팅(wire cutting) 방법으로 두께 2.0 mm로 횡 방향 및 종 방향으로 절단하고 시편의 표면조도를 맞추기 위하여 추가적 연마를 실시하였다. 시편은 종 방향 및 횡 방향 시편 모두 길이와 폭이 170 mm × 25 mm, 170 mm × 50 mm, 170 mm × 55 mm, 170 mm × 75 mm, 170 mm × 120 mm, 170 mm × 125 mm, 170 mm × 135 mm, 170 mm × 170 mm의 총 8가지 형태를 제작하였다. 돔 장출 시험에서 시편의 폭이 가장 큰 170.0 mm에서 점점 감소함에 따라 2축 인장 상태에서 평면인장(plane strain)과 인장-압축의 상태로 변화한다[3]. 시편에서 네킹이 발생하였을 때 주 변형률과 부 변형률은 초기 변형 전 2.5×2.5 mm 크기의 정사각형 그리드를 변형 후 형상을 측정하여 결정한다. Fig. 3과 4는 횡 방향과 종 방향 시편의 돔 장출 시험 후 형상이다. Fig. 5와 6은 종 방향과 횡 방향 시편을 돔 장출 시험으로 얻은 결과를 진변형률로 나타낸 성형한계도이다. 시험 결과 시편의 폭이 120 mm 이상의 시편은 성공적으로 돔 장출 시험을 수행할 수 있었으나, 시편의 폭이 75 mm보다 작거나 같은 시편은 시험 중에 시편을 잡고 있는 브랭크 홀더의 근처에서 파손이 발생하여 성형한계 데이터를 얻는데 실패하였다. 이러한 이유 때문

에 본 연구에서 시편의 폭이 120 mm, 135 mm, 그리고 170 mm의 돔 장출 시험 후 인장-인장 변형률 데이터만 얻을 수 있었다. 따라서 인장-압축 상태의 변형률을 구할 수 없어 이 상태의 변형률을 얻고자 인장시편 형태[2]의 시편을 제작하여 인장 시험기에서 시험을 추가적으로 수행하여 인장-압축 변형률 데이터를 획득 하였다.

돔 장출 시험 결과 인장-인장 영역에서 구리합금의 종 방향 시편의 최대 주 변형률과 부 변형률은 58.2%와 51.5%이며 횡 방향 시편에서는 62.3%와 58.6%로 나타났다. 인장-압축 영역에서 종 방향 시편의 최대 주 변형률은 58.1%이며, 최대 부 변형률은 19.9%이다. 횡 방향 시편의 경우에는 최대 주 변형률이 60.5%이며 최대 부 변형률은 25.8%이다. 이러한 결과들로부터 인장-인장 영역 및 인장-압축 영역에서 횡 방향 시편의 최

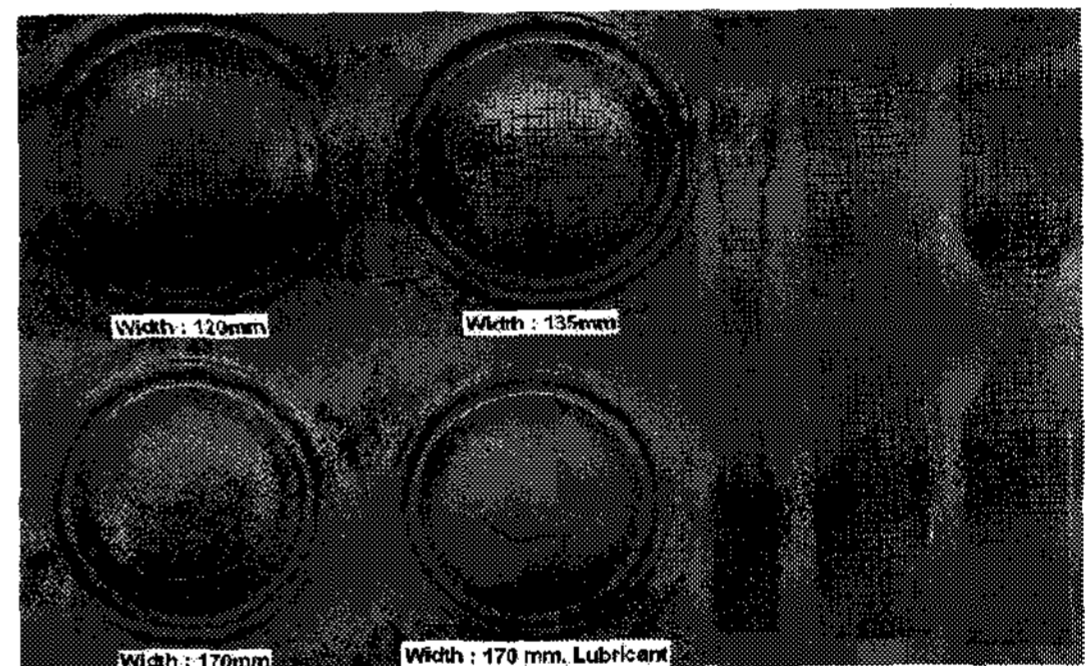


Fig. 3 Configuration after dome stretching and tension test of the transverse specimens

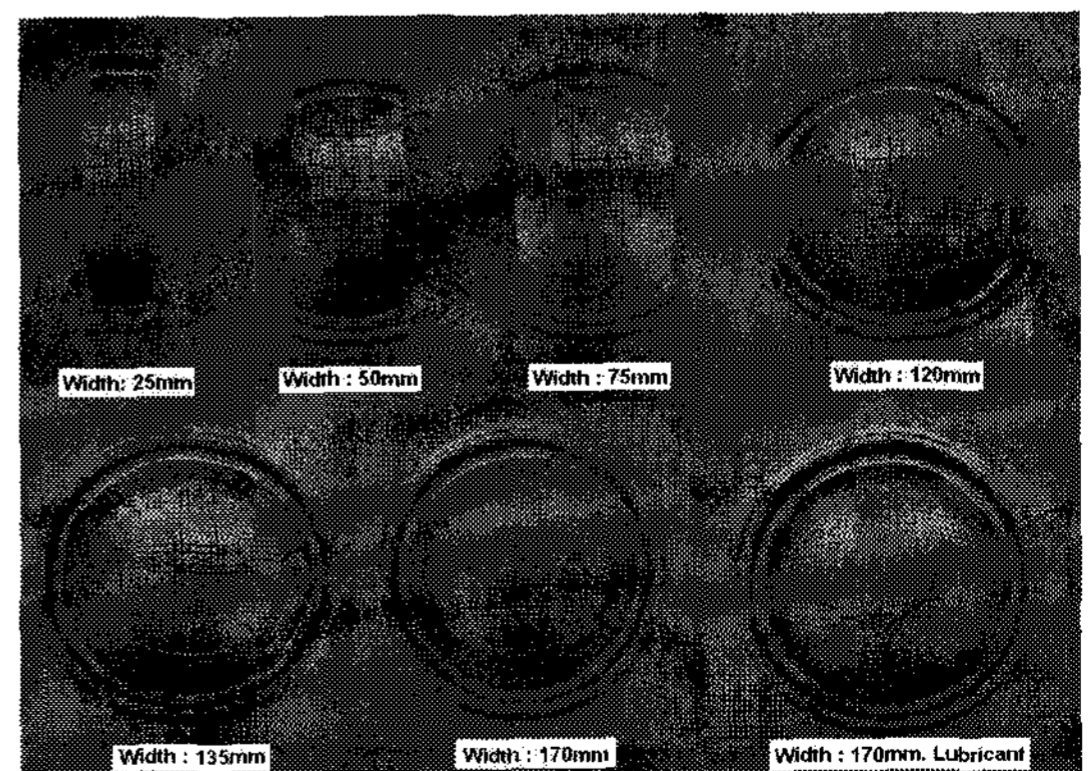


Fig. 4 Configuration after dome stretching test of the longitudinal specimens

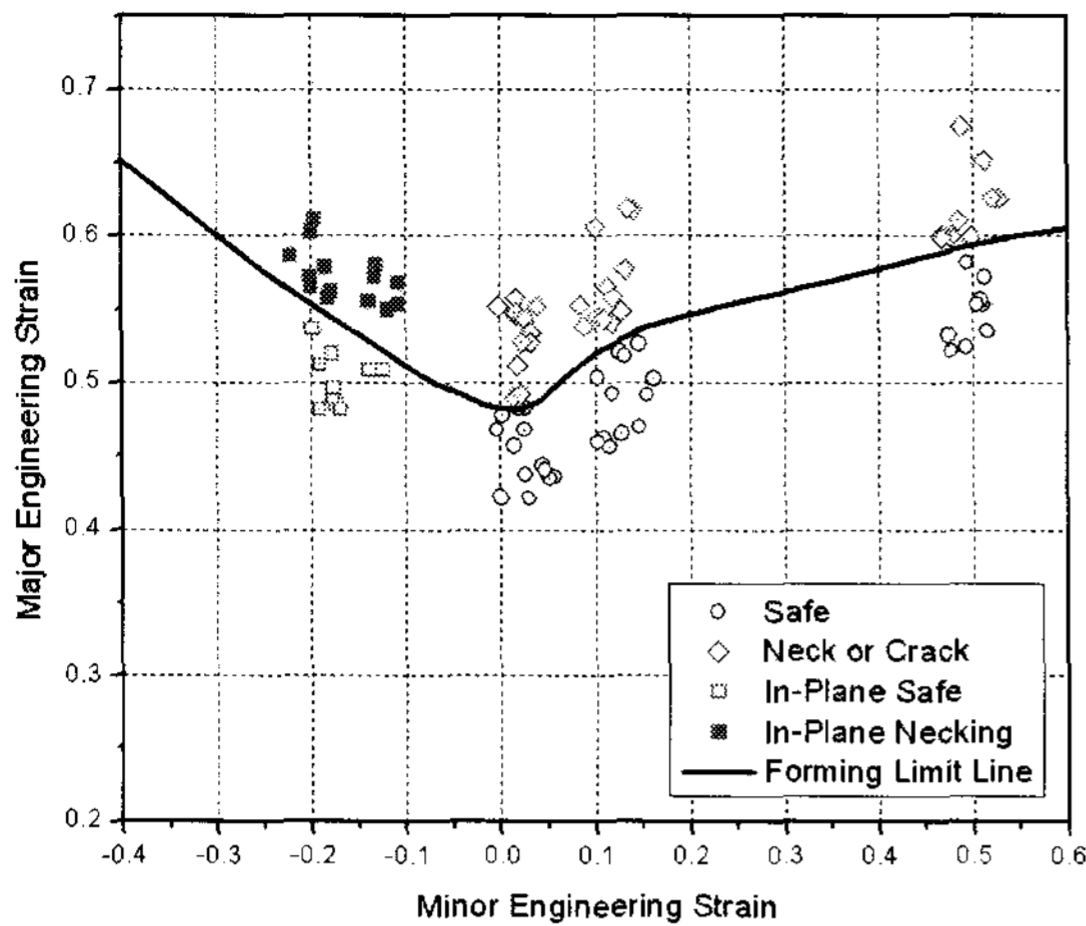


Fig. 5 FLD of the longitudinal direction specimens

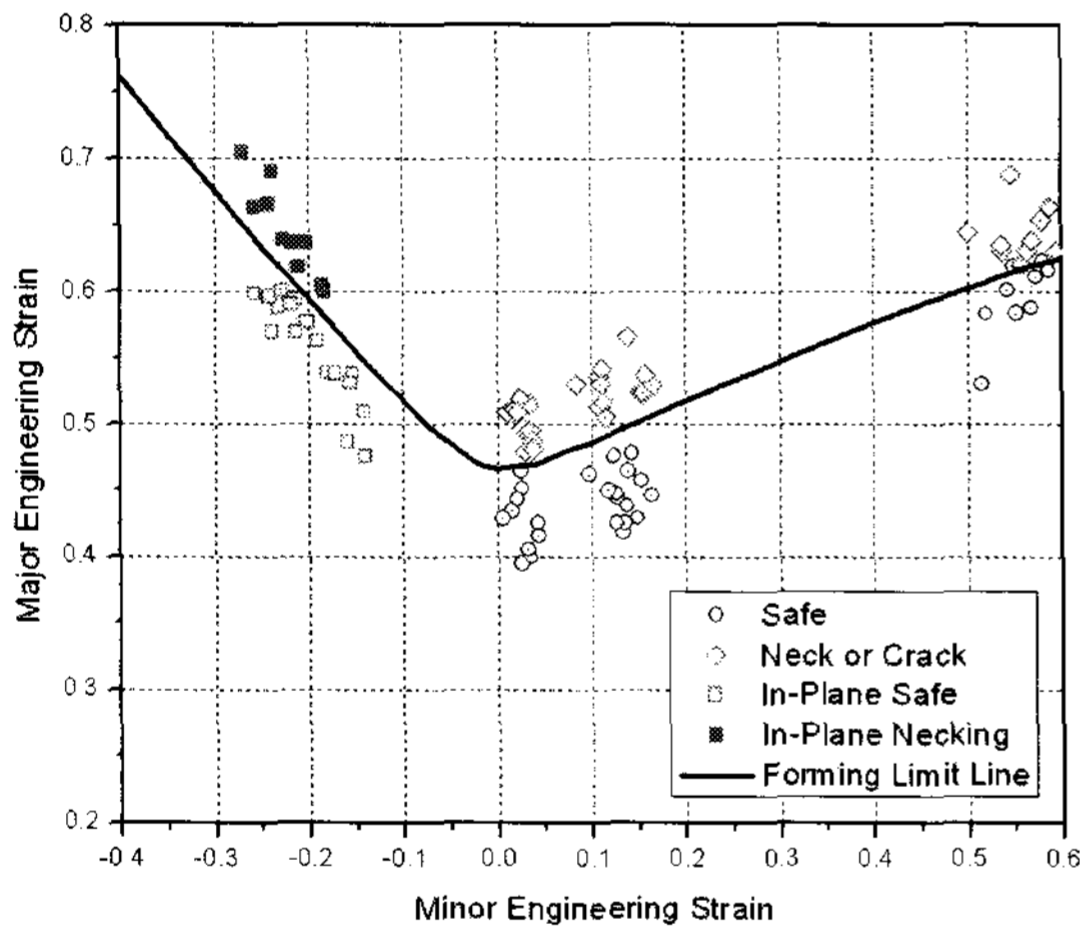


Fig. 6 FLD of the transverse direction specimens

대 주 변형률과 최대 부 변형률이 종 방향 시편에서 나타난 값들보다 크게 나타났으며, 인장-인장 영역에서의 한계변형률이 인장-압축 상태의 한계변형률보다 좀 더 큰 특징을 보여주었다.

4. 결 론

액체로켓 연소기 재생냉각 챔버의 제작에 사용되는 구리합금의 성형성을 평가하고자 돔 장출 시험과 인장시험을 수행하여 구리합금에 대한 성형한계도를 획득하였다. 인장-인장 변형률 상태는 돔 장출 시험 결과로부터 데이터를 획득하였으나 돔 장출 시험용 시편에서 폭이 작은 시편이 시험 중에 파손이 발생하여 인장-압축의 변형률 상태는 단순 인장용 인장시편을 추가로 제작하여 필요한 데이터를 획득하였다. 시험 결과 횡 방향 시편의 한계변형률이 종 방향 시편보다 크게 나타났으며 인장-인장 상태의 한계변형률이 인장-압축 상태의 한계변형률보다 좀 더 크게 나타났다. 향후에는 돔 장출 시험으로 인장-압축 상태의 한계변형률을 얻을 수 있도록 시편의 형상이나 관련 치구들에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. J. K. Lee, G. L. Kinzel and R. H. Wagoner(Eds), "NUMISHEET '96 3rd Int. Conference on Numerical Simulation of 3-D sheet Metal Forming Processes, Verification of Simulation with Experiments," 29 September - 3 October 1996, Dearborn, Michigan
2. Haroldo Beria, et al., "Theoretical and experimental determination of the forming limit diagram for the AISI 304 stainless steel," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 179, 2006, pp. 56-60
3. M. M. Moshksar, S. Mansorzadeh, "Determination of the forming limit diagram for Al 3105 sheet," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 141, 2003, pp. 138-142