

1. AFDEX_V20R01 출시

AFDEX_V20R01 한국 버전이 6월 5일 출시되었다. 다수의 주요 기능이 지난 호에서 소개되었다. 예년에 비하여 2개월 늦게 출시된 것은 프로그램의 레벨업을 위하여 입출력 구조를 대폭 변경하면서 기능의 다양화가 이루어졌고, 이에 따라 프로그램의 시험 및 검증에 다소 긴 시간이 소요되었기 때문이다. 입출력 기능 측면에서 보았을 때, AFDEX_V20R01은 이전 버전과는 다른 프로그램이라고 해도 과언은 아니다. 프로그램의 대폭적인 구조변경은 공정최적설계 및 고급화된 사용자의 기대 수준을 고려하여 이루어졌다. 특히 열점탄소성 해석, 다물체 해석, 판단조 해석, 스프링백 해석, 금형의 엔지니어링 등의 기능이 개선되었으며, 신 기능의 확장성이 제고되었다. 그리고 입출력 기능이 보강되어, 더욱 정확하고 정교한 해석결과를 얻게 되었으며, 링롤링과 같은 특수공정의 해석을 보다 용이하게 되었다.

2. AFDEX_V20 개선기능

2.1 판단조용 금형운동 통계기능을 이용한 메인플레이트 개발

일본과 독일 사용자와의 지속적인 협력을 통하여 판단조의 기능 개선이 꾸준히 이루어져 왔다. 최신 버전에서는 특히 판단조 공정의 해석 기능이 종합화되어 다양한 판단조해석이 가능해졌다. 판단조 해석의 특징은 금형 간의 다양한 상대운동, 하중부과 금형, 정확한 스트로크의 계산, 스프링백, 중요소망, 공정중 피어싱 및 트리밍 해석 등으로 요약된다. 현재 금형 간의 상대운동 및 하중부과 기능 등을 비롯한 관련 기능을 충분히 검증한 상태이다.

그림 2.1은 다단 트랜스퍼 공정의 3차 성형공정이다. 그림에서 보는 바와 같이 금형 2가 2.2 mm 압하 시까지 금형 1은 소재에 하중을 부과하고, 금형 2가 입력된 한계치에 도달하면, 금형 1은 금형 2에 종속되어 함께 운동한다(박기근 등, KSTP 2020 춘계, 2020.06.25.). 이 과정에서 가변 해석스텝 시간계산 기능을 이용하여 정확한 스트로크의 계산은 필수적이다. 그림 2.2는 해석결과와 실험결과를 비교한 것으로 서로 일치하는 것을 확인할 수 있다.

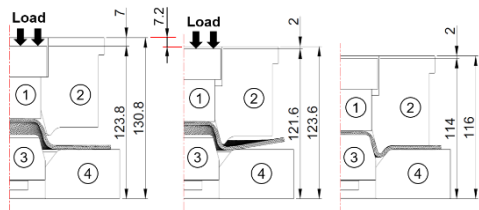


그림 2.1 판단조 공정 설계

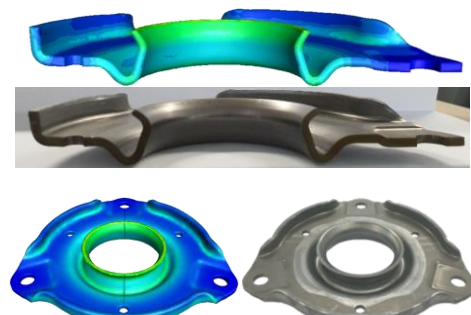


그림 2.2 실험결과와 예측결과 비교

지난 호에 판단조의 기능 개선과 관련하여 이 공정이 소개되었으며, 이번 호에서는 실험을 반복하지 않고 해석에만 의존한 공정의 성공적 개발을 강조하는 의미에서 재소개되었다.

2.2 재료의 유동응력의 획득

해석결과에 가장 큰 영향을 미치는 것은 유동응력이다. 그 다음으로 중요한 것은 마찰법칙이다. 이 두 요소는 사용자의 몫이다. 고급 사용자여부는 바로 이 두 요소를 지배하는 능력에 달려 있다고 해도 과언은 아니다. AFDEX_MAT는 환봉 소재의 인장시험 결과를 이용한 유동응력 곡선을 예측하는 프로그램으로 이 분야에서 독보적인 역할을 담당해 왔다. AFDEX_MAT의 특징은 상온에서 비교적 고변형률(SCM435의 경우, 변형률 1.5 내외까지 가능함)에 대한 유동응력을 계산해 준다는 점이다. 특히 냉간단조에서 열처리 및 인발 등의 전처리 및 소성가공에 따라 유동응력이 달라지는 점을 고려한다면, 간단한 인장시험만으로 개발 및 생산에 사용되는 재료의 유동응력을 획득해 주는 이 기능은 고급 사용자에게 필수적이다. 이런 점에서 결과의 정확도 향상을 위하여 사용자들의 지속적 관심이 무엇보다 중요하다.

이에 관한 연구는 2008년도에 논문(Mech. Mater. 40, 586-593)으로 출판되었으며, 최근들어 DIC 기술과 함께 이와 관련된 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 대부분의 연구는 정확도와 일반성 측면에서 AFDEX_MAT의 기능에 미치지 못하고 있는 것으로 평가되고 있다. 아직 AFDEX_MAT의 기능을 활용하지 못하고 있는 사용자들은 MFRFC가 주최하는 인터넷 교육 등의 기회를 통하여 학습하여 적극 활용하기를 바란다. 마지막으로 동일한 재료이지만, 상온에서 유동응력은 크게 다를 수밖에 없다는 점과 이것을 개발자가 제공하는 유동응력으로 극복하는 것은 불가능하다는 점을 강조하고자 한다.

최근에 판재성형 기업 고객들이 늘어나면서 환봉소재가 아닌 판재소재 인장시험 결과를 이용한 유동응력 획득에 대한 요구가 많았으며, 엑셀을 이용하여 기능을 지원해주거나 사용법 교육을 실시하였다. 이런 방법은 수동적인 측면이 강하여 AFDEX_MAT에 자동화 기능을 추가하였다. 자세한 사항은 Tutorial manual 2D Part2 ex08 을 참고하기 바란다.

2.2.1 Hollomon 모델의 개선

기존의 AFDEX_MAT에서는 Hollomon 모델에서 강도계수 K 가 유효변형률(탄성변형률 포함)의 함수로 계산되었다. 이것은 강소성해석에서 전반부에 동반하는 탄성변형률을 근사적으로 반영하는 것을 염두에 둔 것이다.

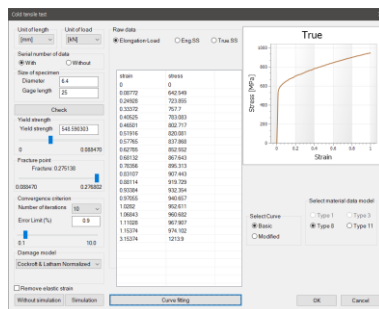


그림 2.3 개선된 Hollomon 모델

새 버전에서는, 그림 2.3의 입력창에서 Remove elastic strain을 선택함으로써, 소성변형률만 이용하여 K 를 유효변형률의 함수($\sigma = K(\epsilon)\epsilon^n$)로 변경하는 기능을 추가하였다. 이 기능은 탄소성해석을 전제로 한 것이다. 그림 2.4는 탄성을 무시하고 획득한 소성변형률에 대한 유동응력을 나타내고 있다. 탄소성해석 시 탄성영역에서는 이 유동응력 곡선을 사용하지 않고, 탄성계수, 포아송 비, 열팽창계수 등이 역학 계산에 사용된다.

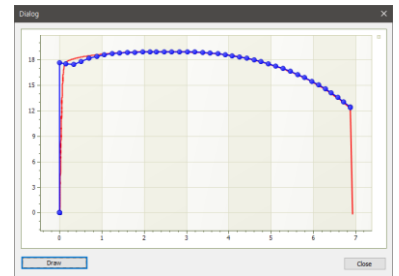


그림 2.4 유동응력의 실험(적색) 및 피팅데이터(청색) 비교

한편, 기존 버전에서 Hollomon 모델($\sigma = K\epsilon^n$)의 계수인 K 값을 피팅하는 기능은 있었으나, 환봉 소재를 대상으로 하는 기능이었다. 판재소재와 관련된 기능 제공을 위해 공칭응력-공칭변형률 데이터, 단면적, 표점거리를 입력한 후, 항복점을 선택하면 Hollomon 모델의 계수를 구해 주는 기능을 개선시켰으며, V20R01 업데이트 버전부터 사용할 수 있다. 그림 2.5에 적용사례를 나타내었다.

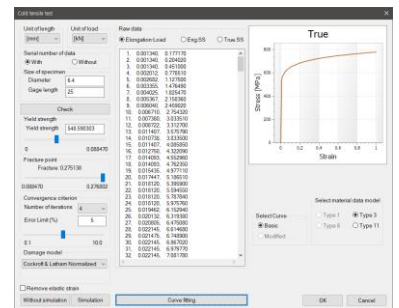


그림 2.5 개선된 Hollomon 모델 적용 사례

2.2.2 탄소성해석을 위한 Swift 모델의 개선

판재성형은 대부분 벤딩 및 스트레칭에 의존하며, 성형해석이 완료되어도 변형률이 0.2 정도로 낮은 경우가 많다. 최근 충돌해석 등과 같이 판재가 찢어지는 영역까지 해석이 요구되고 있고, 때에 따라 성형 중 불필요한 부분에서 네킹 및 파단이 허용되는 경우도 있다. 이런 경우, 그보다 큰 변형률에 관한 유동응력의 획득도 중요하다. 그리고 탄소성을 전제로 할 경우, 소성변형률만을 고려한 유동응력의 획득이 필요하다.

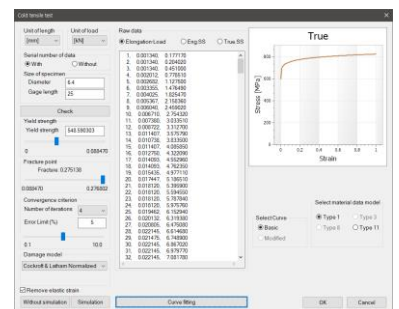


그림 2.6 Swift 모델

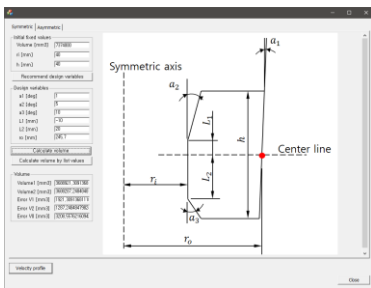
탄소성 유한요소해석을 전제로 한 유동응력 획득을 위하여 그림 2.6과 같이 데이터를 입력한 후, Remove elastic strain을 체크하면 소성변형률만 이용하여 Swift 모델($\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n$)의 계수를 구해주는 기능을 추가하였다.

2.3 링롤링 공정 설계

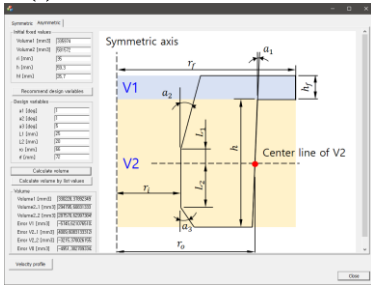
2.3.1 예비형상 설계

링롤링 제품의 예비형상을 설계하는 것은 복잡하지 않지만, 체적을 계산해야 하는 번거로움이 있다. 그리고 링롤링 예비형상으로 단조품을 그대로 사용하는 경우가 많기 때문에 외경부에 경사가 들어가게 된다. 이에 따라 상하부 체적이 달라지게 되는데, 링롤링 공정설계에서 제품의 중심을 기준으로 상하 체적이 같아야 좋은 예비형상 설계라고 할 수 있다. 이것을 맞추기 위해 링롤링 설계자들은 3D CAD 프로그램을 이용하여 상하부의 체적을 따로 계산하는 경우가 많다. 이 과정에서 여러 번의 시행착오를 겪게 된다.

예비형상 설계 프로그램에서는 링롤링 제품의 체적과 예비형상의 설계변수를 입력하면 구분된 영역의 체적을 계산해 준다. 이때 영역별 오차가 0에 가까운 설계변수를 이용하여 모델링하면 시행착오를 많이 줄일 수 있다. 현재, 그림 2.7과 같이 대칭형 제품과 플랜지형 제품의 예비형상 설계를 지원하고 있다. 차후에는 최적설계 기능을 도입하여 오차를 최소화하는 기능을 제공할 예정이다.



(a) 대칭형 제품의 예비형상 설계



(b) 비대칭형 제품의 예비형상 설계

그림 2.7 링롤링 예비형상 설계

2.3.2 메인롤 모션 설계

링롤링 공정 설계에 중요한 요소 중 하나는 메인롤의 모션 설정이다. 기존에 링롤링 공정을 이용한 제품을 설계하고 있는 기업들의 경우 기업내 경험이 축적되어 있을 것이다. 하지만 처음 시도해 보거나 처음 배우는 사람들의 경우에는 공정을 설계하기가 쉽지 않다. 메인롤 모션 설계를 잘못 할 경우 다각형상으로 생산되거나 진원도 불량 문제와 마주칠 수 있다. 최신버전부터 메인롤 모션 설계의 지원 기능을 그림 2.8과 같이 제공하고 있다.

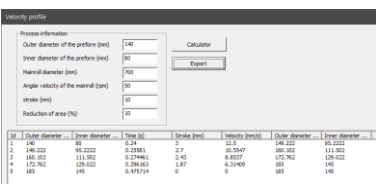


그림 2.8 메인롤 모션 설계

2.4 AFDEX downloader

AFDEX_V20R01부터 빠른 대응을 위해 AFDEX downloader를 제공하고 있다. AFDEX downloader를 실행하면 최신 업데이트 내용을 확인하고 다운로드 받아서 사용할 수 있다. 추후에 자동 패치 기능도 업데이트될 예정이다.

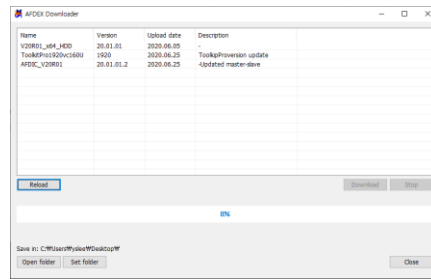


그림 2.9 AFDEX downloader

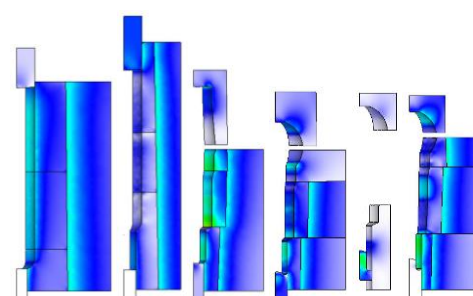
3. 전문가적 사용 사례

2020년도 상반기에 AFDEX 개발팀이 발표한 학술대회 논문 중에서 3편을 소개한다. 그 이외의 AFDEX 신기능 및 개선사항 적용 사례 및 논문은 아래 링크에서 확인할 수 있다.

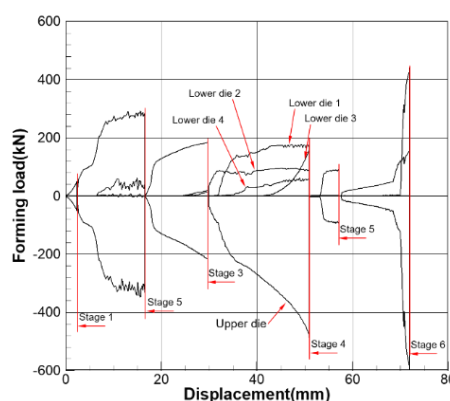
(<http://www.afdex.com>)

3.1 SUS 304 볼스타드 자동다단냉간단조 공정의 완전해석

완전 유한요소해석 기술을 적용하여 실험적으로 규명된 SUS 304 재료의 유동응력을 활용하여 자동다단냉간단조 중 재료의 온도상승에 따른 유동응력의 감소와 금형의 탄성변형이 성형하중과 금형에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 이 연구는 (주)대동과 실시한 산학협력 연구 결과의 일부로 KSTP 2020 춘계학술대회에서 발표되었다. SUS 304의 경우, 고강도 소재이며, 이로 인하여 냉간단조가 어려운 재료에 속한다. 그러나 고강도인 만큼 단조중 온도 상승이 크며, 이로 인한 유동응력 감소가, 특히 SUS 304의 경우 동적변형시효가 없어, 두드러지게 나타나고 있다. 온도의 영향을 고려하지 않고 해석한 결과는 단조가 불가능하다고 할 수가 있지만, 온도의 영향을 고려할 경우에는 그 반대의 결과가 예측될 수가 있다.



(a) 다이인서트와 보강링의 유효응력



(b) 성형하중 - 스트로크 곡선

그림 3.1 SUS 304 재료의 볼스타드 완전해석

그림 3.1의 SUS 304 6단 자동냉간단조공정은 이런 예에 속할 수가 있다. 자동다단냉간단조의 특성상 고속생산과 연속된 단조로 인하여 소재의 온도가 부분적으로 400℃ 가량 상승하며, 특히 변형이 집중되어 금형에 과부하가 가해지는 지점에서 이러한 현상이 발생하여 유동응력을 크게 (약 42%) 낮추는 효과가 예측되었다. 특히 자동다단냉간단조의 경우, 온도를 고려한 공정해석과 공정설계가 필요하다고 사료된다. 이 해석에서는 금형의 탄성변형을 고려한 해석이 이루어졌다. 금형의 탄성변형은 성형하중의 감소효과로 나타난다. 이 적용 사례는 금형의 탄성변형을 고려한 해석이, 특히 고강도 재료의 단조성 여부를 판단할 때, 이루어져야 함을 강조하고 있다.

3.2 동적변형시효와 냉간단조에서 유동응력

관련 문헌에 의하면, S35C와 S45C의 경우, 온도의 상승에 따라 유동응력이 감소하는 것이 아니라 반대로 상승하는 영역이 일정한 변형률에 이르면 발생하는 것으로 알려져 있다. 이 영역은 변형률속도에 영향을 받는다. 이러한 현상, 즉 동적변형시효(dynamic strain aging)는 1970년대부터 활발하게 연구되어져 왔으며, 최근들어 이 현상의 모델링에 관한 연구가 매우 활발하게 이루어지고 있다. 이것이 공정 및 제품의 형상 뿐만 아니라 표면 크랙 등과 같이 재료학적 및 기계역학적으로 영향을 미치는 것으로 알려져 있기 때문이다.

3.1절에서도 설명한 바와 같이, 냉간단조 공정의 정밀해석의 요구와 함께 그 필요성이 부각되고 있다. 이러한 현상은 강 뿐만 아니라, 알루미늄, 티타늄 등의 대부분의 금속에서도 나타나고 있다. 그러나 3.2절에서 소개한 SUS 304의 경우, 이러한 현상이 발생하지 않는 것으로 실험에서 나타났으며, 문헌에서도 그렇게 소개되고 있다. 반면, SUS 430과 SUS 440C의 경우, 분명한 동적변형시효가 목격되고 있다.

이 절의 내용은 (주)풍강과의 산학협력 연구 결과로써 KSTP 2020 춘계학술대회에서 발표된 것으로 S25C에서도 뚜렷하게 동적변형시효가 발생하고 있음을 보여주는 연구결과를 담고 있다. 그림 3.2는 온도와 변형률속도가 일정하다는 조건하에서 실험적으로 획득된 유동응력-변형률 곡선과 AFDEX_MAT를 이용하여 지수승 모델(power law model)로 피팅한 유동응력을 비교하고 있다. 두 결과는 매우 유사하게 나타났다. 실험 결과는 이와 같은 수식모델로 표현되어 해석목적에 사용된다. 그 자체로도 사용될 수 있는 방법은 있으나, 실험결과와 특성상 불연속이 발생하거나 심한 국부적 진동을 유발시킨다. 특히 동적변형시효는 인장시험에서 인장하중의 극심한 진동(jerk flow, serrated flow)을 동반하기 때문에 적절한 피팅의 과정을 거쳐야 한다. 이러한 피팅 과정은, 그 수식모델이 타당할 때, 실험이 안고 있는 문제를 순화하는 긍정적인 역할을 하는 측면이 있다. 최근 동적변형시효 현상을 고려한 유동응력의 수학적 표현에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 이 현상의 복잡성과 재료마다 다른 다양성으로 인하여 큰 어려움을 겪고 있다.

AFDEX_MAT은 이러한 복잡한 유동응력 특성을 가장 단순하고 일반적인 방식을 이용하여 공학적으로 매우 정확한 결과를 제공하고 있다. 그림 3.2에서 실선은 실험으로 획득한 유동응력이고, 점은 AFDEX_MAT을 이용하여 피팅한 곡선상의 점이다. 이 결과에서 보는 바와 같이, AFDEX_MAT으로 피팅된 유동응력 곡선은 전 구간에 걸쳐 충분히 받아들일 수 있을 정도의 정확도를 보이고 있다. 이 유동응력의 특징은, 앞에서 언급한 바와 같이, 200℃까지는 정상적인 분포, 즉 온도의 하강에 따라 유동응력이 감소하는 현상을 보이다가 300℃부터는 유동응력이 역전되는 현상을 보이고 있다. 이것은 동적변형

시효에 따른 것으로 인장시험곡선을 분석함으로써 동적변형시효의 효과로 발생하는 변형경화률의 심한 진동으로부터 그 현상을 간접적으로 입증할 수 있다.

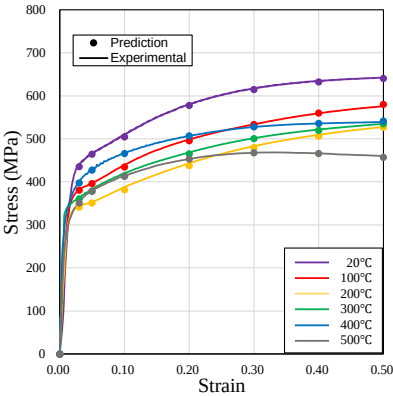


그림 3.2 유동응력 실험 및 피팅데이터의 비교

3.3 복합재료 판재의 체적소성가공에서 박리현상의 3차원 탄소성 유한요소해석

구리의 열전도성 및 브레이징 효율, 알루미늄의 경량성 및 경제성, 강강의 강성 및 경제성, 타이타늄의 내구성 및 표면 미려도 장점 등 다양한 소재의 장점을 활용하기 위한 이종소재를 접합한 클래드 금속(clad metal)와 복합재료의 적용분야가 확대되고 있다. 박판복합재료 성형은 요구특성에 맞게 판재 형태의 복합소재를 접합한 후, 박판성형을 통해서 원하는 형상을 얻게 된다. 이것은 재료 간 접합력의 한계에 따라 최종 제품으로 성형하는 과정에 접합면에서의 인장력 및 전단력 과다로 인한 파단으로 품질 결함이 발생하는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 시뮬레이션을 활용하여 다양한 기계적/열적 성형 조건에서 이종소재간 접합면에서의 접촉거리 및 파단여부 예측이 요구된다. 유한요소해석의 측면에서 살펴 보면, 적층된 소재에 대한 다물체 처리기법과 한계조건을 벗어났을 때 소재간의 박리 현상에 대한 처리기법이 필요하다.

이종소재가 접합되어 있는 조건에서는 소재 접촉면에서 법선방향 및 접선방향의 속도가 동일하다는 조건이 부과되어야 한다. 접합면이 파단된 이후에는 소재 접촉면의 법선방향 속도장은 일치되어야 하고 접선방향으로는 마찰조건이 부과되어야 한다. 접촉면에서의 속도 일치 조건을 부과하기 위해서는 벌칙기법이 적용되었으며, 소재 간의 마찰은 쿨롱마찰법칙으로 수식화되었다. 소재의 접합면의 파단 여부를 예측하기 위해서 Tsai-Wu 모델이 적용되었는데 접합면에서의 한계 인장응력 및 전단응력 대비 부과된 인장응력과 전단응력 비율의 합이 1 이상인 경우 접합면 파단이 일어난다.

이종 소재의 접합 조건에서 따른 박리현상의 발생 여부를 해석하였다. 네 가지의 조건, 즉 이종 소재가 완벽하게 접합되어 분리되지 않는 조건, 법선방향과 접선방향의 한계 접합응력이 200 MPa과 300 MPa인 조건, 이종소재가 접합되지 않고 단순 적층되어 있는 조건 등에 대하여 박리현상을 강조하여 해석을 실시하였으며, 그 결과를 비교하였다. 단순 적층된 경우에는 소재 접촉면에서 슬립이 발생하여 분리되었으며, 200 MPa인 경우에는 일부 박리현상이 나타났다. 300 MPa인 경우에는 접합되어 있는 조건과 동일하게 박리 현상이 발생하지 않는 것으로 예측되었다.

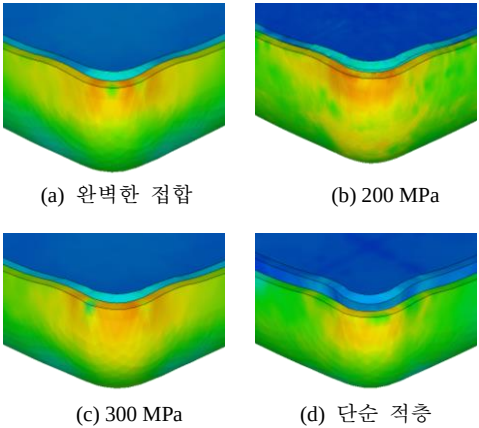


그림 3.3 이종소재 판재성형 해석

4. 공지사항

4.1 AFDEX 정기교육 일정

COVID-19로 인하여 예정되어 있던 AFDEX 정기교육이 취소되었다. AFDEX 팀은 오프라인 교육을 대체하는 방안으로 신청자에 한해 웹미팅 교육 진행을 예정하고 있다.

한편, 유튜브 채널을 통한 이론 및 사용법 교육을 강화하였다. 현재 소성역학 및 유한요소법에 관한 이론과 AFDEX 사용법 등이 교육되고 있다. 아울러 비전공자를 위하여 정역학 및 고체역학, 수학 등에 관한 교육도 이루어지고 있다.

유튜브에서 AFDEX를 검색하거나 아래 링크에서 AFDEX 채널에 접속할 수 있다.

(<https://www.youtube.com/channel/UCEOCsxeB41crHyDCaZUdKjA>)

4.2 금속산업대전 참가

6월 17일부터 20일까지 킨텍스에서 금속산업대전 2020이 개최되었다. 킨텍스와 한국전람측에서 이중으로 코로나19 감염예방에 힘쓴 덕분에 성공리에 마칠 수 있었다. 약 120개사 340부스 규모로 개최된 본 전시회는 단조, 주조, 파스너 등 총 14 가지 산업분야로 구성되었으며 금속 소재부터 기계, 가공기술 등 금속산업 전반에 관련된 다양한 품목을 전시하였다. MFRC도 4일간 전시부스를 운영하였으며, 소성가공 시뮬레이터의 전반적인 기술설명과 신제품 홍보를 통해 인지도 향상에 힘썼다.

4.3 MFCAE 2020

매년 8월 셋째주에 개최되었던 MFCAE를 정부의 확산방지 정책협조 및 코로나바이러스 감염의 예방을 위해 올해는 개최하지 않는다. 대신 Webinar 및 AFDEX 홈페이지와 유튜브 채널을 통한 기본 자료 및 신기술 발표를 수시로 실시함으로써 사용자와의 호흡을 같이하고자 노력할 예정이다.