

전단-구조연계해석을 이용한 새시부품 전단금형의 형상설계

김세호^{1,*}

Shape Design of Shearing Die for the Chassis Part with the Coupled Analysis of Shear and Die Structure

S. H. Kim

(Received August 8, 2022 / Revised August 27, 2022 / Accepted August 29, 2022)

Abstract

To reduce the weight of the vehicle, the application of the high strength steel sheets to chassis parts is increased. High forming load is induced during the shearing process of steel chassis parts made of high strength steel, and the possibility of an eccentric load is increased depending on the product seating condition on the die, which decreases the stability and lifespan of the die. In this paper, a three-dimensional finite element analysis with the continuum element was conducted using the damage theory for the cam-trimming process of the front lower arm. The structural analysis of the trimming die was performed with the forming load result obtained from the analysis, and the amount of deflection and the stress distribution of the die during the shearing process were evaluated for the confirmation of the tool stability. The shape of the weak region of the die was modified according to structural analysis and then the stability was confirmed with the finite element analysis. The analysis result showed that the possibility of tool failure during cam-trimming process was remarkably reduced, and the reliability of the proposed modified design was validated.

Keywords: Shearing Process, Chassis Part, Finite Element Analysis, Damage Theory, Tool Structure

1. 서 론

연비 및 배출가스 규제 등 강화된 요구에 따라 차량 경량화가 지속적으로 추진되고 있다. 이를 위하여 경량 소재 적용과 더불어 기존 일반강 대비 강도가 크게 강화되고 성형성이 동등 수준인 초고강도강이 개발되어 사용되고 있다. 새시부품의 특성상 주로 적용되는 열연강판의 경우에는 성형성 뿐만 아니라 버링 등의 공정에 특화된 신장 플랜징 특성이 우수한 FB(Ferrite-Bainite) 강판 등이 널리 적용되고 있다.[1]

새시부품의 특성상 두께 3mm 이상의 후판이 적용되는 경우가 대부분으로 인장강도 600MPa 이상의

고강도 강판이 사용될 경우 일반강 사용의 경우보다 금형과 소재 접촉에 의한 성형하중이 크게 증가하게 된다. 금형의 소재로 STD11 등 기존 금형강을 사용하는 경우 금형강도, 내구성, 내마모성이 크게 열화되는 문제가 발생하게 된다. 특히 형상 성형 후 실시하는 트리밍 또는 피어싱 공정 등 전단공정에서 높은 전단력이 발생하며, 제품 안착상태에 따라 편심하중 발생의 가능성도 높아져 금형의 안정성 및 수명에 문제가 발생하는 경우가 증가한다.[2] 양산공정 중 금형의 변형 또는 파손이 발생하게 되면 보수 용접 등을 통하여 불량 부위를 개선하고 성형 작업을 재개하기 때문에 생산능력 및 생산비 측면에서도 손실을 가져오게 된다.

현재 고강도 강판을 적용한 프레스 금형 제작 시 전단가공이 수반되지 않은 성형공정에서는 금형구조해석 및 구조의 최적화를 수행하고 있다.[3][4] 그

1. 대구대학교 기계공학부, 교수

* Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Daegu University, E-mail: mvksh@daegu.ac.kr
ORCID: 0000-0002-1535-3613

러나 전단가공용 금형의 경우에는 기존에 사용하던 트리밍 공법 및 금형 설계방법을 구조해석 등의 검증 없이 적용하여 설계 및 제작을 수행하고 있는 실정이다. 트리밍을 수행하는 전단금형의 강도 및 안정성 평가를 위하여 금형구조해석 등의 설계기법 검증 방법 활용 및 금형강도와 금형변형 등에 대한 정량적인 분석이 필요하다.

본 논문에서는 손상이론과 연속체 요소를 활용한 유한요소해석을 통하여 자동차 새시부품인 프론트 로워암의 전단공정인 캠-트리밍 공정을 대상으로 3차원 해석을 실시하였다. 해석에서 얻어진 성형하중 정보를 활용하여 금형의 구조해석을 수행하고 이에 따라 전단공정 중 금형의 안전성을 평가하였다. 금형 파단의 발생이 예측된 부위의 금형 구조를 보강하여 성형중 금형파단의 가능성을 낮추었으며, 응력 및 변형량 비교를 통하여 제안된 수정설계의 신뢰성을 검증하였다.

2. 전단공정 해석

2.1 대상 제품 및 금형파단 문제점

본 논문의 대상부품은 단판형 프론트 로워암(front lower arm)으로 제품의 형상과 치수를 Fig. 1에 도시하였다. 대상부품은 Fig. 2와 같이 폼(form), 트리밍-피어싱, 플랜징, 리스트라이킹, 캠-트리밍, 버링 등이 복합된 총 5단계의 프레스 성형공정으로 제작된다.

Fig. 3에 캠-트리밍 공정에서 빈번하게 발생하고 있는 A점부 금형의 파단형상을 도시하였다. Fig. 4에 도시한 바와 같이 캠 진입 시 간섭 회피를 위하여 하형의 두께가 1.97mm로 소재의 두께에 비하여 과소하게 설계되어 있으며, 이전 단계 성형 이후 발생하는 제품의 스프링백을 고려하지 않은 금형 설계로 전단공정 시 제품이 고정되지 않아 편심하중이 발생하게 되어 파단이 발생한 것으로 분석되었다.

2.2 전단공정해석 조건

캠-트리밍 공정 시 발생하는 금형의 파단문제를 분석하기 위하여 전단공정의 유한요소해석을 실시하였으며, 해석에서 얻은 하중정보를 활용하여 금형의 구조해석을 실시하였다. 전단공정과 금형구조의 유한요소해석은 상용 유한요소프로그램인 FORGE NxT[5]를 이용하였다.

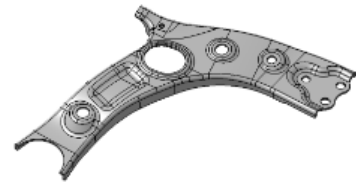


Fig. 1 Shape of the single-plate front lower arm

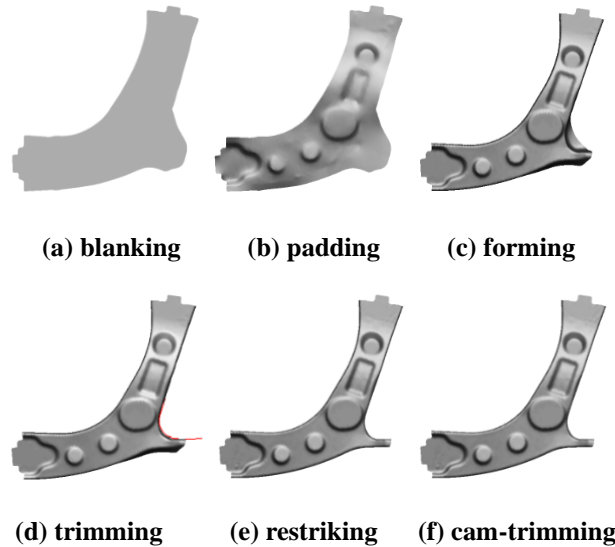


Fig. 2 Schematic view of the stamping layout of the front lower arm



Fig. 3 Fracture phenomena of the tool during the cam-trimming process

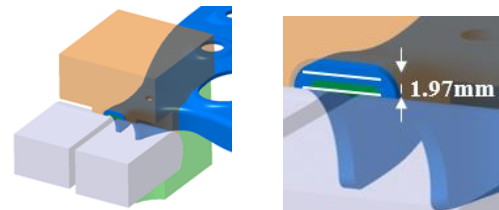


Fig. 4 Schematic view of the tools around the fracture area

블랭크 소재는 고강도 열연 강판인 SPFH590-FB 소재이며 두께는 3.2mm이다. 블랭크 소재의 모델링을 위하여 사면체 연속체 요소[6]를 적용하고 소재의 파단을 예측하기 위하여 손상모델을 적용하였다. 소재의 물성치를 Table 1에 도시하였다. 손상모델은 Normalized Cockroft-Latham 모델[7]을, 항복함수는 Hill의 1948 평면이방 모델[8]을 사용하였다. 임계 손상계수는 인장시험에서 얻은 1.2를 사용하였다. 블랭크와 금형 사이의 쿨롱 마찰계수는 무윤활 조건을 가정하여 0.12를 부과하였으며, 금형의 속도는 2m/s를 부과하였다.

전단공정해석을 실시하기 위한 유한요소 기본 모델을 Fig. 5와 Fig. 6에 도시하였다. 해석시간을 고려하여 A점 부근의 캠-트리밍이 진행되는 영역만을 단순화하여 해석에서 고려하였다. 캠-트리밍 공정을 위한 초기 모델의 형상을 얻기 위하여 3차원 연속체 요소를 활용한 성형해석을 할 경우 해석시간이 매우 많이 소요되어 셀요소를 활용한 해석을 수행

Table 1 Mechanical properties of SPFH590-FB

YS(MPa)	526.8	e_f	0.219
r_0	0.68	K (MPa)	895.3
r_{45}	1.32	ϵ_0	0.012
r_{90}	0.86	n	0.130

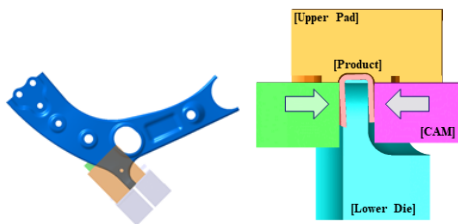


Fig. 5 Shape and tool movement of the simplified model for the finite element analysis

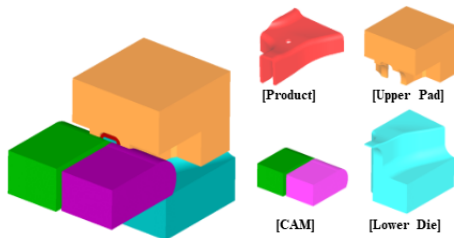


Fig. 6 Finite element model for the analysis of the cam-trimming process

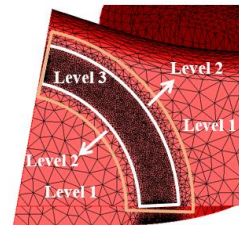


Fig. 7 Region for the mesh refinement for the analysis of the cam-trimming process

하고 두께를 부과하여 전단해석을 실시하였다. 전단 해석을 위하여 Fig. 7과 같이 제품을 3개 영역으로 구분하고 최소 요소크기를 level 1, 2, 3의 영역에서 각각 1.0mm, 0.5mm, 0.2mm로 세분화하였다.

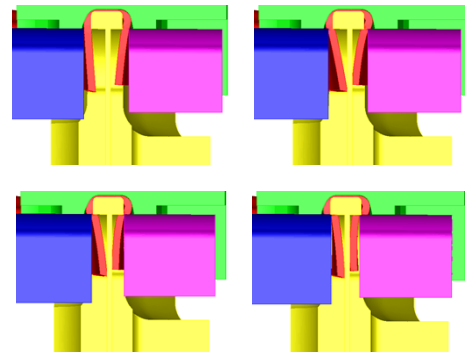


Fig. 8 Subsequent deformed shapes of the product and the die during the cam-trimming process

2.3 전단공정 해석 결과

2.2 절에 서술한 해석조건을 바탕으로 캠-트리밍 공정의 유한요소해석을 실시하였다. Fig. 8 에 공정 중 블랭크와 금형의 형상을 도시하였다. 제품 변형 형상 분석 결과 캠-트리밍 공정은 성공적으로 수행되었다. 단, 전 단계 공정에서 제품의 스프링 백이 발생하였고 캠-트리밍 공정의 패드 및 하형이 스프링백을 고려하지 않고 설계되어 강제 패딩에 의한 편심하중이 작용할 것으로 예상된다. 또한 좌우측에서 트리밍이 동시에 진행되므로 금형에 큰 편심하중이 부과될 것으로 예상된다.

Fig. 9 에 공정 전 제품과 금형의 형상의 차이를 비교하였으며, 제품의 스프링백을 고려하지 않은 패드와 하형의 형상에 의하여 제품이 금형에 안착하지 않아 금형에 들림 및 굽힘 하중이 과도하게 발생할 가능성이 높음을 예측할 수 있다.

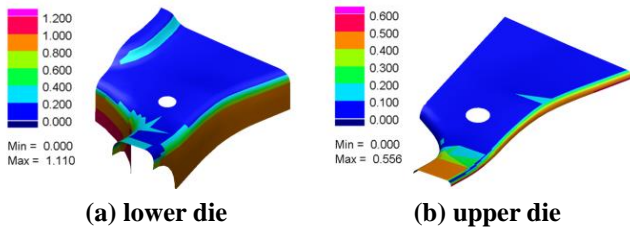


Fig. 9 Measured distance between the die and the blank seated before the cam-trimming process (unit: mm)

2.4 금형구조 해석

전단해석에서 얻은 하중정보를 바탕으로 전단 금형의 구조해석을 실시하였다. 해석에 적용한 금형재료는 STD11로 탄성계수, 항복강도, 인장강도는 각각 210GPa, 1034MPa, 1158MPa를 부과하였다. 구조해석은 최대 하중 시점의 하중정보를 활용하여 실시하였으며, 금형의 A부 성형 부위에서의 응력과 변형량으로 안정성을 평가하였다. Fig. 10에 금형 취약부에서의 응력과 변형량 분포를 도시하였으며, 최대 응력은 1.5GPa이 도출되었으며, 최대 변형량도 0.31mm로 매우 큰 값을 나타내었다. 금형구조 해석결과 금형의 보강을 통하여 파단 가능성을 낮추는 것이 필요함을 확인할 수 있었다.

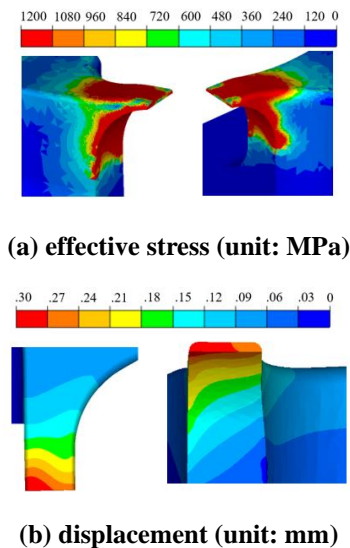


Fig. 10. Simulation results obtained from the finite element structural analysis of the lower die with the base model

3. 금형형상 변경

3.1 금형형상 변경 개요

2.4절에 서술한 해석결과를 바탕으로 캠-트리밍 금형의 형상을 변경하고 형상변경의 효과를 금형구조해석을 통하여 확인하였다. 캠-트리밍 부위 형상 확보를 위한 A점부 하형 두께의 과소 설계 및 좌우 전단과정이 동시에 진행되는 것이 금형에 집중하중 및 편심하중을 부과하는 효과가 있는 것으로 파악되었다. 따라서 금형의 집중하중을 완화할 수 있는 설계변경안을 Fig. 11과 같이 3가지로 도출하였다. CASE 1은 A점부 하형의 구조보강을 통하여 1.97mm의 금형두께를 7.7mm로 증가시키는 방안이며, CASE 2는 CASE 1과 동일한 금형구조에 좌우측 전단공정을 순차적으로 실시하는 방안이다. CASE 3는 좌우측 전단공정을 동시에 실시하되 캠-트리밍 하형 금형을 길이 방향으로 연장하고 구조적으로 보강하는 방안이다.

3.2 금형형상 변경 검증

3.1절에 서술한 금형구조 변경안의 효과를 검증하기 위하여 캠-트리밍 공정의 전단해석을 실시하고 금형구조해석을 실시하였다. Fig. 12에 각 설계안의 전단공정 중의 제품 형상을 도시하였으며, 모든 경우 트리밍이 문제 없이 성공적으로 진행되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 13에 전단이 완료된 제품의 끝부가 내측으로의 휘어 들어간 각도를 비교하였다.

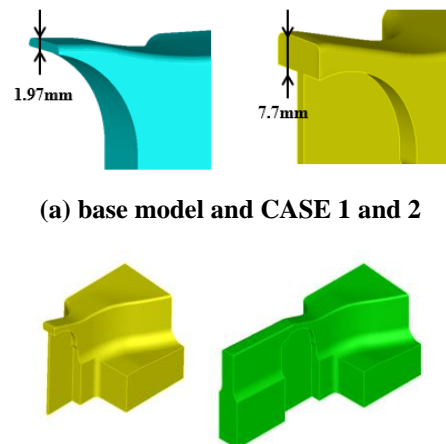


Fig. 11 Schematic comparison of the lower die shape

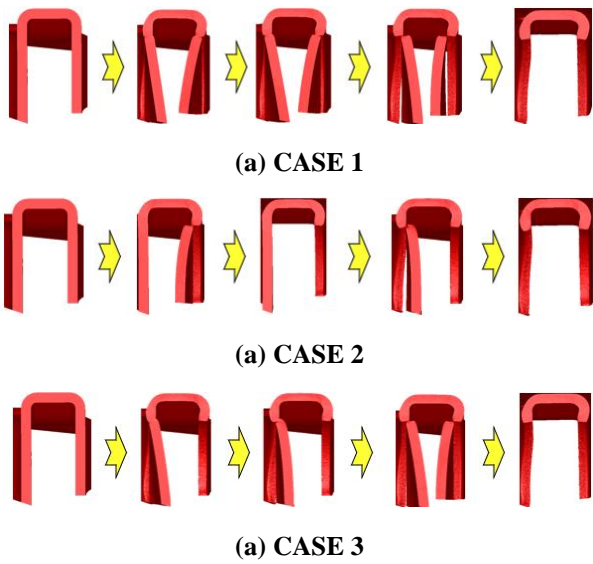


Fig. 12 Subsequent deformation shape of the product

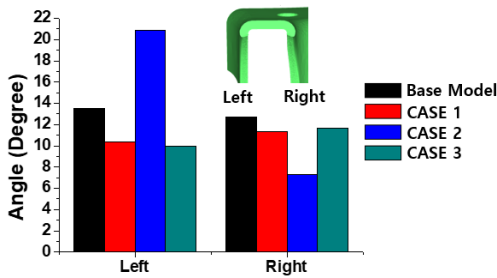


Fig. 13 Comparison of angle of twist among design modification

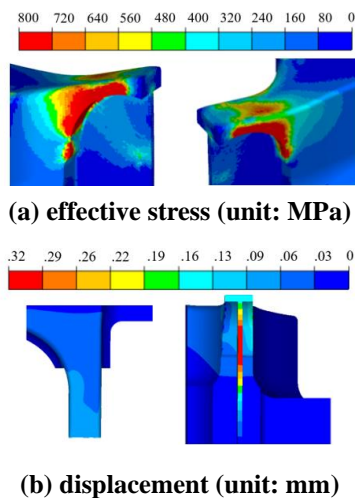


Fig. 14. Simulation results obtained from the finite element structural analysis of the lower die with CASE 1

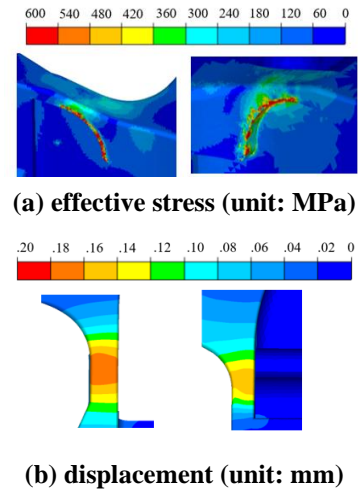


Fig. 15. Simulation results obtained from the finite element structural analysis of the lower die with CASE 2

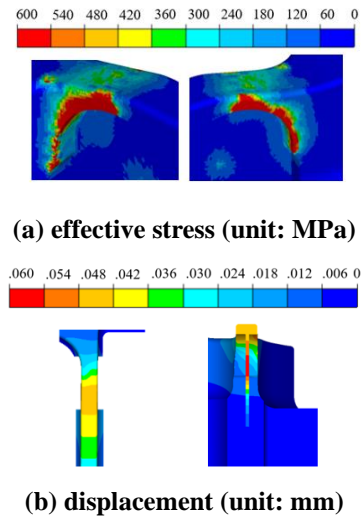


Fig. 16. Simulation results obtained from the finite element structural analysis of the lower die with CASE 3

공정을 분할한 CASE 2의 경우가 힘량이 제일 큰 값을 보였으며, 이는 전단공정을 분할할 경우 제품 전체에 형상불량을 야기할 수 있음을 의미한다.

Fig. 14~16에 금형구조해석 결과를 응력과 변형률의 비교로 나타내었다. CASE 1의 경우 하형 지지부 두께를 증가시킨 효과로 최대 응력이 1.0GPa로 감소하였으나 최대 변형량은 0.33mm로 유사한 수준으로 나타났다. CASE 2의 경우 순차적으로 전단공정을 실시한 결과 최대응력과 최대 변형률이 각각 610MPa와 0.19mm로 감소한 결과를 얻었다. CASE 3의 경우

전단공정을 동시에 진행하고 트리밍 부의 금형을 길이방향으로 연장한 결과 최대응력과 최대 변형률이 각각 670MPa과 0.06mm의 향상된 결과를 얻었다.

최대 응력의 관점에서는 CASE 2의 경우가 우수한 것으로 보이나 트리밍을 동시에 실시하여 얻는 생산성 향상 및 좌우측 동시 전단공정 실시에 따른 힘량 감소의 측면에서 CASE 3의 변경안을 따라 설계변경을 실시하는 것이 실용적인 측면에서 유리할 것으로 파악되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 고강도강을 적용한 자동차용 새시 부품인 프런트 로워암의 캠-트리밍 공정에서 발생하는 금형의 파손현상을 예측하고 이에 대한 금형수정안을 도출하기 위하여 3차원 전단공정 해석 및 연계 금형구조해석을 실시하였다. 본 논문에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 600MPa급 고강도 FB 강판으로 성형된 프런트 로워암의 캠-트리밍 공정을 분석하기 위하여 3차원 유한요소 모델을 구성하였다. 손상이론을 적용한 연속체 유한요소해석을 실시하고 캠-트리밍 공정의 유한요소해석을 실시하였다.

(2) 전단공정해석에서 얻은 하중정보를 바탕으로 금형 구조해석을 실시하였으며, 초기의 모델에서 최대응력 1.5GPa, 최대변형량 0.31mm로 금형의 취약부가 존재하며 응력집중에 의한 파손의 가능성이 높음을 확인하였다.

(3) 금형의 취약부를 보강하기 위하여 3개 안의 금형구조 설계변경안을 도출하였으며, 이 중 하형 지지부의 두께 증대, 도입부의 길이방향 연장 등의 안을 제시하여 최대응력 670MPa과 최대 변형량 0.06mm의 결과를 얻어 초기 설계안 대비 수정 금형안의 안정성을 입증하였다.

후 기

본 연구는 2019학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의한 논문임.

REFERENCES

- [1] Y. R. Cho, J. H. Chung, H. H. Koo, I. B. Kim, 1999, A Study on the Stretch-flangeability of Hot-Rolled High Strength Steel with Ferrite-Bainite Duplex Microstructures, Korean Journal of Materials Research, Vol. 8, No. 12, pp. 1252~1262.
- [2] Y. J. Kim, 2012, Failure Analysis of Insert Die for Front Lower Arm G Bush and its Failure Prevention, M. S. Thesis, University of Ulsan, Ulsan, Korea.
- [3] Y. J. Song, I. S. Oh, S. H. Hwang, H. Choi, M. G. Lee, H. J. Kim, 2021, Numerically Efficient Sheet Metal Forming Simulations in Consideration of Tool Deformation, Int. J. Automot. Technol., Vol. 22, No. 1, pp. 81~87.
<https://doi.org/10.1007/s12239-021-0008-4>
- [4] K. H. Kang, J. H. Kwak, S. B. Bae, S. H. Kim, 2017, Design Guideline for Press Tool Structure of Ultra-high Strength Steel Part with Shape Optimization Technique, Transactions of Materials Processing, Vol. 26, No. 6, pp. 372~377.
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2017.26.6.372>
- [5] Transvalor, 2011, FORGE NxT 1.0, Users' Manual.
- [6] J. H. Kwak, S. J. Yoon, S. H. Kim, J. K. Park, H. G. Han, 2017, Prediction of Deformed Mechanism and Fracture for an Auto-Part with Advanced High Strength Steel using Solid Element and Damage Theory, Transactions of Materials Processing, Vol. 26, No. 5, pp. 293~299.
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2017.26.5.293>
- [7] M. G. Cockcroft, D. J. Latham, 1968, Ductility and Workability of Metals. Journal of the Institute of Metals, Vol. 96, pp. 33-39.
- [8] R. Hill, 1948, A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals. Proceedings of the Royal Society A, Vol. 193, No. 1033, pp. 281~297.
<https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045>